

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

Možnosti využití bambusu pro stavbu lávek v ČR

The possibility of using bamboo for building bridges in the Czech  
Republic

Student:

Lukáš Podešva

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Ostrava 2016

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta



Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

## **Anotace**

Předmětem této bakalářské práce je možnost využití bambusu pro stavbu lávek v ČR. Cílem práce je prozkoumat problematiku bambusu, jeho používání jako stavební materiál a dále jeho konkrétní aplikace pro MKP model lávky. Pro teoretický model lávky bude zvoleno statické schéma příhradové konstrukce. Práce se bude zabývat stanovením účinků zatížení, statickým a dynamickým výpočtem, návrhem a posouzením vybraných nosných prvků a spojů. Udávané mechanické vlastnosti bambusu budou porovnány s výsledky laboratorního zkoušení. Výstupem bakalářské práce bude navržená bambusová lávka včetně její dokumentace, která by měla být vhodná pro výstavbu v ČR.

## **Klíčová slova**

Bambus, Guadua angustifolia, lávka, laboratorní zkouška

## **Anotation**

The subject of this thesis is the possibility of using bamboo for building bridges in the Czech Republic. The aim of this thesis is to survey bamboo as material in civil engineering and then to apply bamboo for FEM model of footbridge. For theoretical model of footbridge will be elected truss static scheme. This thesis will concern about determination of load, static and dynamic calculation and dimensioning of representative bearing elements and joints. The mechanical properties of bamboo will be proof by laboratory testing. The result of this thesis will be proposed bamboo footbridge with documentation included, which might be suitable for usage in Czech Republic.

## **Key words**

Bamboo, Guadua angustifolia, footbridge, laboratory test

## Seznam použitého značení

- velká písmena latinské abecedy

$A$	Plocha průřezu	$[\text{mm}^2]$
$A_{\text{osl}}$	Oslabená plocha průřezu	$[\text{mm}^2]$
$B$	Součinitel odezvy pozadí	$[-]$
$C_e$	Součinitel expozice	$[-]$
$C_t$	Tepelný součinitel	$[-]$
$E$	Modul pružnosti	$[\text{MPa}]$
$E_{0,05}$	5% kvantil modulu pružnosti	$[\text{MPa}]$
$E$	Modul pružnosti	$[\text{MPa}]$
$F_k$	Charakteristická hodnota zatížení	$[\text{kN}]$
$F_{kw}$	Charakteristická hodnota zatížení větrem	$[\text{kN}]$
$F_w$	Zatížení větrem do uzlů	$[\text{kN}]$
$I_v(z)$	Intenzita turbulence	$[-]$
$I_y$	Moment setrvačnosti k ose y	$[\text{MPa}]$
$I_{y,\text{osl}}$	Oslabený moment setrvačnosti k ose y	$[\text{MPa}]$
$I_z$	Moment setrvačnosti k ose z	$[\text{MPa}]$
$L_{\text{cr}}$	Vzpěrná délka prvku	$[\text{m}]$
$L(z_s)$	Měřítka délky turbulence	$[\text{m}]$
$L_t$	Měřítka délky	$[\text{m}]$
$M_{\text{max}}$	Maximální ohybový moment	$[\text{kNm}]$
$M_{\text{Ed},y}$	Ohybový moment ve směru osy y	$[\text{kNm}]$
$M_{\text{Ed},z}$	Ohybový moment ve směru osy z	$[\text{kNm}]$
$M_{y,Rk}$	Plastický moment únosnosti svorníku	$[\text{Nm}]$
$N_{\text{max}}$	Maximální normálová síla	$[\text{kN}]$

$R$	Rezonanční část odezvy	[-]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$R_{h,b}$	Aerodynamické admitace	[-]
$R_k$	Charakteristická hodnota reakce	[kN]
$S_L(z_s, n_{1,x})$	Výkonová spektrální hustota	[-]
$S_y$	Statický moment průřezu k ose y	[kNm]
$V_{max}$	Maximální posouvající síla	[kN]
$W_{el}$	Elastický průřezový modul	[m <sup>3</sup> ]

- malá písmena latinské abecedy

$a_{3,c}$	Minimální délka nezatíženého konce	[mm]
$a_{3,t}$	Minimální délka zatíženého konce	[mm]
$a_{4,c}$	Minimální délka nezatíženého okraje	[mm]
$a_{4,t}$	Minimální délka zatíženého okraje	[mm]
$b_{(z)}$	Tloušťka průřezu ve středu průřezu	[m]
$c_{dir}$	Součinitel směru	[-]
$c_f$	Součinitel síly	[-]
$c_{f,0}$	Součinitel síly pro nosné prvky	[-]
$c_{p,net}$	Součinitel výsledného tlaku	[-]
$c_r$	Součinitel drsnosti	[-]
$c_s c_d$	Součinitel konstrukce	[-]
$c_{season}$	Součinitel ročního období	[-]
$c_0(z)$	Součinitel ortografie	[-]
$d$	Průměr tyče	[mm]
$g$	Gravitační zrychlení	[m·s <sup>-2</sup> ]
$g_k$	Charakteristická hodnota vlastního zatížení	[kN/m]

$i$	Poloměr setrvačnosti	[mm]
$f_{c,0,k}$	Charakteristická pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	[MPa]
$f_{c,0,d}$	Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	[MPa]
$f_{h,0,k}$	Charakteristická pevnost v otažení rovnoběžně s vlákny	[MPa]
$f_{t,0,k}$	Charakteristická pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny	[MPa]
$f_{t,0,d}$	Návrhová pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny	[MPa]
$f_L(z,n)$	Bezrozměrná frekvence	[-]
$f_{m,d}$	Návrhová pevnost v ohybu	[MPa]
$f_{m,k}$	Charakteristická pevnost v ohybu	[MPa]
$f_{v,d}$	Návrhová pevnost ve smyku	[MPa]
$k_c$	Součinitel vzpěru	[-]
$k_{def}$	Součinitel pro dotvarování dřeva	[-]
$k_m$	Redukční součinitel pro průřezy u posudků	[-]
$k_{mod}$	Modifikační součinitel pro dřevo	[-]
$k_p$	Součinitel maximální hodnoty	[-]
$k_r$	Součinitel terénu	[-]
$k_l$	Součinitel turbulence	[-]
$n_{1,x}$	Základní vlastní frekvence	[Hz]
$p_k$	Spojitě liniové charakteristické zatížení	[kN/m]
$p_{Ed}$	Spojitě liniové návrhové zatížení	[kN/m]
$q_b$	Základní tlak větru	[kNm <sup>-2</sup> ]
$q_{Rk}$	Odolnost trapézového plechu	[kN/m <sup>2</sup> ]
$q_p(z)$	Maximální charakteristický tlak	[kN/m <sup>2</sup> ]
$s_k$	Charakteristická hodnota zatížení sněhem	[kN/m <sup>2</sup> ]
$t$	Tloušťka stěny	[mm]
$v_{b,0}$	Výchozí základní rychlost větru	[m/s]
$v_b$	Základní rychlost větru	[m/s]



$v_m(z)$	Charakteristická střední rychlost větru	[m/s]
$w_k$	Liniové zatížení pro vítr	[kN/m]
$w_{inst}$	Okamžitý průhyb	[mm]
$w_{fin}$	Konečný průhyb	[mm]
$z_1$	Výška pochozí vrstvy nad terénem	[m]
$z_e$	Výška střešního hřebene nad terénem	[m]
$z_{min}$	Minimální výška	[m]
$z_t$	Referenční výška	[m]
$z_0$	Parametr drsnosti terénu	[m]

- malá písmena řecké abecedy

$\alpha$	Sklon střechy	[°]
$\beta$	Poměr mezi pevností otláčení spojovaných prvků	[-]
$\delta$	Logaritmický dekrement útlumu	[-]
$\delta_{limit}$	Limitní hodnota průhybu	[-]
$\gamma$	Úhel zatížení vzhledem k vláknům svislice	[°]
$\gamma_G$	Bezpečnostní součinitel pro zatížení stálé	[-]
$\gamma_Q$	Bezpečnostní součinitel pro zatížení proměnné	[-]
$\lambda$	Štíhlost	[-]
$\lambda_{rel}$	Relativní štíhlost	[-]
$\nu$	Kinematická viskozita vzduchu	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_{m,y,d}$	Napětí v průřezu při spodních vláknech ve směru osy y	[MPa]
$\sigma_{m,z,d}$	Napětí v průřezu při spodních vláknech ve směru osy z	[MPa]
$\tau_{v,d}$	Smykové napětí	[MPa]
$\varphi$	Součinitel plnosti	[-]

$\psi_\lambda$	Součinitel koncového efektu	[-]
$\psi_0$	Součinitel pro kombinační hodnotu zatížení	[-]
$\psi_2$	Součinitel pro kvazistálou hodnotu zatížení	[-]

# Obsah

Seznam použitého značení.....	9
1. Úvod.....	17
2. Popis problematiky bambusů a bambusu z rodu Guadua.....	19
2.1 Druhy bambusů.....	19
2.2 Zatřídění.....	19
2.3 Růst a pěstování.....	20
2.3.1 Stavba stonku.....	20
2.3.2 Proces růstu.....	21
2.3.3 Rozmnožování.....	21
2.3.4 Zemina a její vlastnosti.....	22
2.3.4 Klimatické faktory.....	23
2.4 Kácení a sběr.....	23
2.5 Sušení.....	25
2.6 Konzervační ošetření.....	26
2.7 Výtěžnost bambusu a pozitivní ekologické dopady na životní prostředí.....	27
3. Použití bambusu.....	28
3.1 Základní vyráběné díly.....	29
3.2 Obecné požadavky a vlastnosti bambusu pro konstrukci.....	31
3.2.1 Výhody bambusu.....	31
3.2.2 Nevýhody bambusu.....	31
3.2.3 Výběr bambusových tyčí pro konstrukci.....	31
3.3 Řešení detailů.....	32
3.4 Bambus v Evropě.....	32
3.5 Normy.....	33
3.6 Hořlavost.....	33
3.7 Spoje.....	33
3.7.1 Tradiční spoje.....	34
3.7.2 Moderní spoje.....	39
3.8 Mechanické vlastnosti.....	42
4. Řešená konstrukce lávky.....	46
4.1 Výpočet obecných účinků zatížení.....	46
4.2 Statický výpočet přístřešku.....	48
4.2.1 Výpočet krytiny.....	48
4.2.2 Vaznice.....	48
4.2.3 Krokev.....	49
4.3 Výpočet hlavní nosné konstrukce.....	50
4.3.1 Statický výpočet nosné konstrukce.....	50
4.3.2 Výpočet mezního stavu použitelnosti.....	56
4.3.3 Dynamický výpočet.....	56

4.4 Návrh a posouzení vybraných nosných prvků.....	58
4.5 Návrh a posouzení vybraných spojů.....	61
5. Laboratorní ověření vlastnosti bambusu.....	63
5.1 Popis zkoušek.....	63
5.1.1 Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny.....	64
5.1.2 Stanovení pevnosti v ohybu.....	65
5.2 Vyhodnocení zkoušek.....	65
5.2.1 Pevnost v tlaku.....	65
5.2.1 Pevnost v ohybu.....	66
6. Závěr.....	70
7. Seznam použitých pramenů.....	71
8. Seznam příloh.....	72
9. Seznam výkresové části.....	73



## 1. Úvod

V České republice slovo bambus bývá dosti exotický pojem. Pokud jde o přírodní materiály, tak pochopitelně v použití ve výstavbě vévodí listnaté a jehličnaté dřevo, které je historicky spjaté s naší zemí. Nemůžeme však přehlížet vynikající vlastnosti bambusové tyče, která v mnohém překonává vlastnosti konvenčního dřeva a to hlavně v nízké hmotnosti a pevnosti v tahu, tlaku a ohybu, proto bychom se měli zabývat jeho využitím v našich podmínkách.

Ve svých oblastech kde roste přirozeně je hojně využívaným přírodním materiálem a to nejen ve stavebnictví, ale také pro různé předměty domácích potřeb, nábytek a v poslední době se vyskytly pokusy pro využití pro konstrukce automobilů a kol. Bambus můžeme najít také tam, kde bychom to nejméně čekali. Po určitou dobu se bambusové vlákno používalo jako vlákno v žárovkách nebo dnes můžeme také najít oděvy ušité z tohoto materiálu. Pro domorodce bambus není pouze zdroj pro výrobu předmětů a staveb, ale také zdroj potravy, proto je tato rostlina ve svých oblastech kulturně a historicky spjata s obyvatelstvem. V zemích jako Mexiko, Kolumbie, Indonésie, Indie nebo Bangladéš se nachází největší koncentrace staveb. Nejde pouze o prosté venkovské stavby nebo lešení, ale v těchto zemích s dlouhou tradicí využívání bambusu můžeme najít stavby, které plně konkurují ve svém účelu a vzhledu plně stavbám z konvenčních materiálů.

V Evropě jde stále o kontroverzní materiál, ale i přesto v posledních letech došlo k velkému rozmachu hlavně díky ukázce zdárné výstavby pavilonů na světové výstavě EXPO v letech 2000 v Hanoveru a 2010 v Šanghaji. Díky tomu bambus začíná být v Evropě stále více objevený a využíván nejen pro výstavbu pozemních staveb, ale také mostů a lávek.

Musíme mít na paměti, že bambus nepatří mezi stromy, ale mezi traviny a také právě díky tomu vyniká svou vysokou rychlostí růstu, která je rozhodujícím faktorem pro pěstování. Zpracování díky nízké hmotnosti probíhá velice rychle a je spotřebováno minimum energie. Z těchto důvodů do budoucna představuje bambus pro stavitelství vysoce potenciální zdroj rychle obnovitelného stavebního materiálu.

Velkou nevýhodou bambusové tyče je jeho náchylnost k podélnému praskání při vysychání, obzvlášť v období zimy. Proto je nutné konstrukce před nadměrným vysycháním chránit.

Rychlé a ekonomické pěstování je možné pouze v oblastech s vysokými srážkami, teplotami a vlhkostí, proto pro evropské bambusové stavby můžeme počítat pouze s importem bambusu z oblastí, kde roste přirozeně.

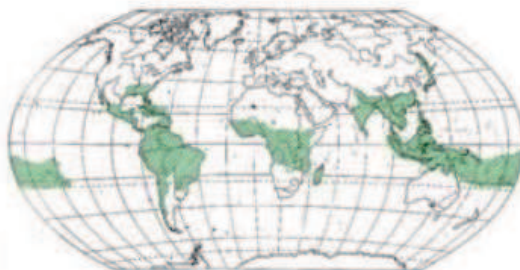
Ve světě se nejvíce používají bambusy z rodu *Guadua* a *Moso*. *Moso* je nejvíce využívanou rostlinou v jihovýchodní Asii. Největší plantáže *Guaduy* se zase nachází v Kolumbii. I když vlastnosti bambusu *Guadua* a *Moso* jsou téměř vyrovnané, o něco větších pevností dosahuje *Guadua*. Následující model lávky bude zkonstruován z bambusu rodu *Guadua*. [1]



## 2. Popis problematiky bambusů a bambusu z rodu *Guadua*

### 2.1 Druhy bambusů

Různé druhy divoce rostoucích bambusů můžeme najít na všech kontinentech kromě Evropy a Antarktidy (viz obr.1). Existují tropické a subtropické druhy, kterým se daří v různých přírodních podmínkách, od deštných pralesů s vlhkostí nad 90% až po polovyprahlé části Indie. Avšak většina bambusů roste v tropických oblastech deštných pralesů s vysokou relativní vlhkostí. Několik málo druhů můžeme také nalézt v suchých podnebných pásmech nebo ve výškách nad 4000 m n.m.. V Číně nebo Japonsku se nalézají druhy, které snesou teploty pod bodem mrazu. Existuje přibližně 1 200 druhů. Z toho 750 se nalézá v Asii a 450 v Americe. Nejvíce rozmanitá bambusová flóra se nalézá v Brazílii.



**Obr.1:** Rozložení bambusových pralesů [11]

Ve stavebnictví jsou nejpoužívanější rody bambusů *Bambusa*, *Dendrocalamus*, *Guadua*, *Gigantochloa*, *Dendrocalamus* rostoucí v tropických oblastech nebo pro mírná pásma rod *Phyllostachys*. Ačkoliv máme na výběr z mnoha druhů bambusů, které buď rostou uměle v našich oblastech nebo z některých levnějších druhů, pro nás zůstává neoptimálnější volbou *Guadua angustifolia* z rodu *Guadua*. [1] Jde o jeden z nejpoužívanějších rodů pro stavební účely z důvodů, které vyplynou z následujícího obsahu. Bakalářská práce a následná konstrukce se bude zabývat pouze touto rostlinou.

### 2.2 Zatřídění

Slovo bambus jako botanický termín poprvé zavedl Carl von Linné v roce 1753 ve své biologické nomenklatuře. *Guadua angustifolia* může být tedy dále zařazena jako: [12]

- Říše: rostliny
- Podeříše: cévnaté rostliny
- Oddělení: krytosemenné
- Třída: jednoděložné
- Řád: lipnicotvaré
- Čeleď: lipnicovité
- Podčeleď: bambusovité



- Rod: guadua
- Druh: angustifolia

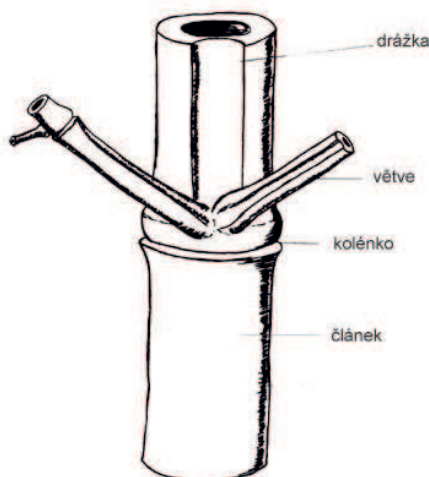
Tedy *Guadua angustifolia* spadá pod bambusovité, avšak technicky nepatří do rodu *bambusů*, tvoří vlastní rod *guada*. Zde budeme dále tuto rostlinu nazývat „bambusem“. Bambusy jsou příbuzenstvím blíže travinám tím, že spadají pod čeleď lipnicovité. Tato rostlina je původní flórou v Jižní Americe. Byla pojmenována Karl Sigismund Kunthem v roce 1822, který slovo „Guadua“ převzal od domorodců žijících v Kolumbii. Pralesy, kde bambus rostl, se nazýval „Guaduales“.

## 2.3 Růst a pěstování

### 2.3.1 Stavba stonku

Stonek bambusu roste z podzemní části, oddenku. Oddenky pachymorfních bambusů, mezi které patří také *Guadua*, rostou do všech směrů a vytváří tak hustou síť do výšky až 2m. Z oddenků rostou následně výhonky, které jsou nahuštěny blízko sebe a formují dohromady hustý porost. Oddenek leptomorfních rostlin roste naproti tomu horizontálně pod zemí hadovitým způsobem.

Skladebnými částmi stonku jsou kolénko a článěk (viz obr.2). Bambus roste svým charakteristickým způsobem. Všechny zárodečná kolénka a články jsou uschovány ve výhonku. Během růstu se zvětšuje pouze délka článků. Jako první se začnou zvětšovat články ve spodnější části. Jakmile dosáhne stonek své konečné výšky, začne se stonek a jeho kolénka rozšiřovat. Větve a listy raší z kolének. [1] [11]



**Obr.2:** Stéblo bambusu [11]

### 2.3.2 Proces růstu

Rychlost růstu je ohromující. Za den dokáže vzrůst o 21 cm. Tímto tempem rostlina dosáhne 80% své celkové výšky během jednoho měsíce. Během dalším pěti měsíců doroste do své celkové výšky, která činí 15 m až 30 m. Následný proces lignifikace, proces kdy bambus dřevnatí a zpevňuje se, trvá čtyři až sedm let, poté se jeho buněčná struktura uzavírá a vysychá. Bambus je po lignifikaci připraven na sběr a použití. Stonek během růstu bývá zpravidla zelený, po lignifikaci nabývá hnědé barvy. Vlhkost stonku v zelené fázi bývá kolem 80%. [11]

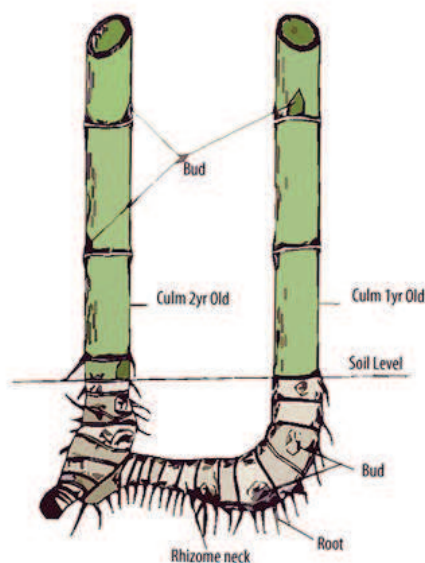
Vlhkost prostředí se výrazně podepisuje na následné pevnosti. Bambus rostoucí ve vlhčím prostředí s vlhčí půdou nedosahuje takové pevnosti, jako zástupci rostoucí v sušších podmínkách. Může za to buněčná struktura stonku, která je hustší, když je rostlina pěstována v sušších prostředích.

Bambusy kvetou poměrně vzácně ve svých cyklech trvajících 40-100 let. Zvláštností bývá také, že určitý druh bambusu kvete současně na celém kontinentě nebo i na celém světě. Rostlina po okvětním stádiu hyne. [11]

### 2.3.3 Rozmnožování

Výsadba a rozmnožování může probíhat čtyřmi způsoby: [1] [10]

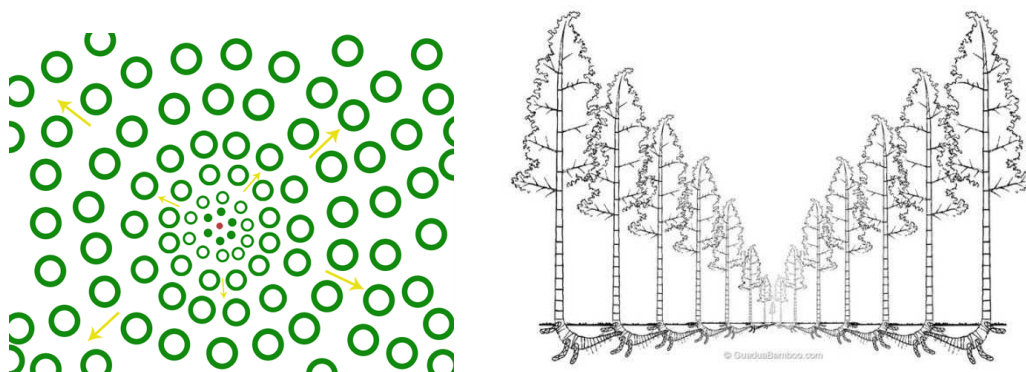
- Chusquinovou metodou (malé rostliny, které raší z mateřského oddenku)
- Výsadbou stonků obsahujících kolénka a pupeny. Tato metoda je velice populární, protože je jednoduchá, rychlá, nenáročná na místo a ekonomická. Vybereme na dospělé rostlině vzrostlou větev, která by měla mít stáří 1-2 let, odsekne a odstraníme okrajovou část. Necháme pouze holou větev se třemi články, které dále sázíme.
- Výsadbou části oddenku. Jde o tradiční vegetativní metodu a pravděpodobně také nejpoužívanější technika u bambusů. Má velké procento úspěšnosti, protože při procesu je přesazen celý kořenový systém.
- *Guadua angustifolia* se přirozeně rozmnožuje pomocí oddělování dalších oddenků od mateřského oddenku (viz obr.3). Tyto oddělené oddenky jsou následně vykopávány a oddělovány. Řez provedeme opatrně přes krk oddenku. Oddělený oddenek se musí chránit před vysycháním zabalením do banánových listů nebo igelitových sáčků a po celou dobu se s ním musí nakládat šetrně. Sázíme do připravených záhonů co nejdříve. Celý proces uskutečňujeme na konci období sucha, kdy v oddenku je největší podíl škrobu a živin. I když úspěšnost této metody bývá 100%, má řadu nevýhod. Je velice pracná a časově náročná (jeden oddenek váží 30-35 kg). Můžeme takto získat pouze dva až tři oddenky z jedné mateřské rostliny, neboť by mohla být mateřská rostlina poškozena.



**Obr.3:** Rozmnožováním oddělováním oddenků [1]

#### - Semeny

Přirozený způsob rozmnožování probíhá buď pomocí semen nebo oddělování oddenku. Při oddělování se kolem mateřské rostliny nahromadí rostliny následující generace a takto směr růstu pokračuje ze středu ven. Přitom stonky, jejich stěny a celkové výšky jsou vždy u každé následující generace větší (viz obr.4). Například první generace začíná na průměru stonku 2mm a končí na průměrech nad 100mm. Tento postupný trend trvá až 9 let, kdy se průměry stonků stabilizují. Průměr stonků se nezvětšuje v průběhu růstu, tak jako u stromů, nýbrž zůstává po celý život bambusu stejný. Nárůst v síle stonku je dán pouze pořadím generace. [10]



**Obr.4:** Schéma přirozeného růstu bambusů. Znázornění nahuštění stonků a jejich tloušťek. Vlevo půdorys, vpravo v pohledu. [10]

### 2.3.3 Zemina a její vlastnosti

Textura zeminy je po množství srážek nejdůležitější faktor úspěšnosti pěstování. Půda nemusí být nutně bohatá na humusovité látky, mnohem více rozhodující pro správný růst je zrnitost, měrná hmotnost a celková textura zeminy. Vhodné nejsou těžké, jílovité, železité nebo hlinitanové půdy.

Naopak nejpříznivější jsou půdy lehké, písčité, aluviální nebo půdy obsahující sopečný prach obecně půdy spadající pod siSa (písek prachovitý) nebo saSi (prach písčité). Tedy půdy pórovité a nasákavé s nízkou objemovou hmotností, ve kterých snadno cirkuluje vzduch a přežívají mikroorganismy pro vytváření nezbytného mikroklima. V neposlední řadě úspěšnost pěstování a velikost výtěžnost velice závisí na chemickém složení půdy. Samozřejmě větší zisky budeme mít v úrodných půdách s vysokým podílem humusovitých látek. Guadua je však také možné pěstovat v chudých půdách, ale nemůžeme čekat nějak dobré výsledky. Optimální pH je mezi 6,5 a 6,3. Klesne-li pH pod 4,5, jsou půdy naprosto nevhodné a musí se upravovat. I když Guadua potřebuje ke svému růstu vysokou vlhkost, nesnáší záplavová území. Guadua v něm snadno hyne a to až z 80% případů. [10]

### 2.3.4 Klimatické faktory

- **Teplota:** Optimální průměrné teploty se ohybují v mezích 20-26 °C. Není však klíčovým faktorem. Guadua dokáže snášet velké teplotní výkyvy. Může růst v oblastech, kde v létě dosahuje teplota 40 °C nebo v oblastech, kde teplota klesá k 4°C. To nám dává na vědomí, že i když jde o tropickou rostlinu, tak se dokáže snadno adaptovat i na klima mírného nebo subtropického pásma, avšak za cenu nižších výsledných rozměrů. Guadua pěstovaná v nižších teplotách vykazuje větší pevnosti než ty ve vyšších teplotách než je optimál. [10]
- **Nadmořská výška:** Optimální nadmořská výška činí 900-1600 m n.m.. Růst je ale možný také ve výškách od 50 do 2400 m n.m.. [10]
- **Srážky:** Guadua snáší roční srážky od 1270 do 5000mm. Neoptimálnější jsou však srážky od 2000 do 2500mm. Ze všech klimatických faktorů jsou právě srážky nejzásadnější. Je-li bambusová farma vystavena srážkám nižším než 1270mm, velice negativně to ovlivní konečnou výtěžnost. Nedoporučuje se zakládat bambusové farmy s předpokladem umělého zavlažování. Z ekonomického hlediska by zavlažování představovalo příliš velké náklady a pěstování by se snadno nemuselo vyplatit. Pro srovnání průměrné roční srážky v ČR činí 680mm za rok. [10]
- **Zeměpisná šířka:** Souvisí s průměrnou roční teplotou. Zeměpisná šířka původu je 4° severní. [10]
- **Relativní vlhkost:** Optimální vlhkost se pohybuje v mezích 75-85%. Guadua si svou přirozenou vlhkost generuje sama. [10]
- **Vítr:** Vhodná rychlost větru je 15km/h. Nad 80km/h se stonek může poškozovat. [10]

V přírodě se pro *Guadua angustifolia* nacházejí nejlepší podmínky v jihoamerických Andách v nadmořských výškách mezi 900 a 1600 m n.m. při teplotách 20 až 26 stupňů Celsia. Průměrné roční srážky zde dosahují 2000-2500mm za rok, vlhkost vzduchu zde dosahuje 75-85%. Taky se zde nachází půda bohatá na aluviální naplaveniny a sopečný prach. [10]

## 2.4 Kácení a sběr

Kácení bambusových stonků se může provádět ručně za pomoci mačety nebo pily. Řez se provádí nad prvním nebo druhým kolenem nad zemí a vždy by měl být nakloněný, tak aby dešťová voda stékala ze stonku, jinak by docházelo k hnilobě oddenku. Kácení by mělo probíhat za suchých období, kdy stonky mají minimální vlhkost. Pozorováním se také prokázalo, že zde existuje určitá spojitost mezi vlhkostí stonku a fázemi měsíce. Vlhkost je také ovlivňována denní dobou. Nejnižší vlhkosti dosahuje při ubývajících fázích a ranní dobou, před východem slunce.

Načasování sklizení bambusu hraje velkou roli v životnosti a odolnosti materiálu vůči různým škůdcům, plísním a houbám z následujícího důvodu. Bambusový stonek obsahuje velké množství škrobu, který je významnou potravou těchto škůdců. Takže jakmile poklesne obsah škrobu, stává se také materiál více odolný vůči škůdcům. Obsah škrobu se v průběhu roku mění. V období sucha bambus si snaží uchovávat zásobní škrob pro pozdější expanzní růst. Proto je velice nevhodné provádět sběr na konci období sucha. V období dešťů, kdy rostlina je ve fázi růstu spotřebovává své škrobové zásoby. Relativní vlhkost je ale zase vysoká. To by poté mohlo následně způsobovat nežádoucí praskání při vysychání, kdyby byl bambus takto sklizen. Navíc v období dešťů raší nové výhonky a ty by mohly být těžbou porušeny. Proto jinými slovy je nejlepší sklizeň provádět na konci období dešťů. [1]

Velice důležité je určení stáří bambusu. Při raném stádiu, kdy rostlina má jeden až tři roky stáří, obsahuje menší procento škrobu. Při postupném stárnutí obsah škrobu narůstá. Ovšem, že nebudeme chtít sklízet mladší stonky, protože nevykazují tak dobré mechanické vlastnosti jako u starších. Důležité je nechat ve stonku probíhat proces lignifikace, kdy materiál nabývá na odolnosti. Nejlepší stáří určené pro sběr bývá mezi čtvrtým a sedmým rokem. Po překročení sedmi let se stonek začíná rozpadat a zhoršují se jeho vlastnosti. Když se barva mění ze sytě zelené, kdy na stonku jsou výrazné bílé proužky v místech kolenou, na barvu tmavě zelenou a s proužky šedé, je to znak vyzrálости stébla. Na druhou stranu když barva celého bambusu se mění na naředlou, je to znak přezrálости a bambus již nemůže být následně použit. Zralý a vhodný bambus v podstatě můžeme poznat tím, že je pokryt malými v průměru tři centimetry velkými lišejníkovými skvrnami (viz obr.5).



**Obr.5:** Zleva: nedozrálé, zralé, přezrálé stéblo [10]

Při samotném kácení se musíme vyhnout vláčení bambusů po zemi nebo by mohlo docházet k nežádoucímu porušování povrchu. Při pokládání nesmí dotyčný házet s nařezaným kusem, protože při takových otřesech by mohla vzniknout podélná prasklina.[10]

## 2.5 Sušení

Běžnou a tradiční metodou jak sušit bambus je ho nechat po přerézání ve vertikální poloze a pouze ho ve stoje opřít o druhou rostlinu. Takto uložený bambus bude dále spotřebovávat zásoby nežádoucího škrobu a společně s vypařující se vodou přes listy bude klesat vlhkost. V tomto stavu by měl setrvávat po čtyři týdny. Dále budou osekány všechny listy a větve a materiál může přejít do další fáze sušení.

Během následných úprav musí být přepážky ve stéblu proraženy, tak aby se později ochranný nátěr dostal do hmoty přes vnitřek. Nutné je také povrch bambusu povrchově vyčistit a vysušit.

Čerstvý bambus obsahuje mnoho hygroskopických látek, kvůli nimž má vlhkost větší než u dřevin a to kolem 60%. Během sušení se tyč smršťuje a mění své rozměry. Průměr se může zmenšit o 10% až 16% a tloušťka stěny o 15% až 16%. Kvůli smršťování čerstvé tyče nesmí být použity do konstrukcí. Spoje by se mohly časem uvolnit a způsobit nežádoucí komplikace. K sušení se používá několik následujících způsobů. [1]

- **Sušení vzduchem:** Nejjednodušší metoda je sušení v otevřeném prostranství. Tyče jsou vztyčeny a postaveny do tvaru A na dva týdny (viz obr.6). Během dne jsou dvakrát přetočeny, tak aby během sušení dostávaly rovnoměrnou nahnědlou barvu. Nebo u modifikovanějšího způsobu se může teplý vzduch uměle vhánět kompresory.



**Obr.6:** Sušení na vzduchu [1]

- **Mikrovlnné sušení:** Výhodou této metody je rychlost, kdy se voda vypařuje z hloubky. Je ale poměrně drahá a technologicky náročná.
- **Sušení pomocí tepla:** Jednoduchá metoda využívající teplo z rozžhavených uhlíků. Tyče se položí horizontálně nad uhlíky.

- **Pomocí zeminy:** Tuto prostou metodu využívají venkované v Bangladéši. Bambus se položí to drtě z jíloviny. Jílovina poté nasaje určité množství škrobu a vlhkosti.

## 2.6 Konzervační ošetření

Konzervace je u bambusových tyčí pro konstrukci nanejvýš důležitá. Této části by se měla věnovat vysoká pozornost. Neošetřená tyč vystavena klimatickým podmínkám vydrží nanejvýš dva roky. Tyč uschovaná před větrem a deštěm má životnost mezi čtyřmi a sedmi roky. Za dobrých ošetřovacích podmínek může materiál dosáhnout životnosti až padesát let. Období zimy, kdy absolutní vlhkost vzduchu klesá, je obzvlášť pro bambusové tyče kritické. Vlhkost bambusu v zimě klesá, proto se můžou na tyčích snadno objevit podélné praskliny. V následujícím textu jsou popsány způsoby ošetřování. [1]

- **Vápenná ochrana:** Jednoduchá metoda pro ochranu povrchu vůči houbám, plísním, lišejníkům a hmyzu. Roztok obsahující  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  díky svému vysokému pH funguje jako insekticid a fungicid. Avšak roztok postrádá vlastnost přilnavosti, proto se časem z povrchu smývá. Z toho důvodu se povrch může natřít asfaltovou emulzí a posypat štěrkovou drtí.
- **Konzervace plněním bambusové tyče:** Tyč ve vertikální poloze a s proraženými přepážkami až na poslední se zaplní konzervační tekutinou a nechá se chvíli působit. Poté se poslední přepážka prorazí a tekutina se nechá vylít.
- **Aplikace ochranné vrstvy ponořením:** Jedna z nejefektivnějších metod aplikace ochrany. Je důležité, aby přepážky uvnitř byly všechny proraženy nebo se může navrtat vnější stěna, avšak ne v jedné rovině, tak aby se zabránilo podélnému praskání. Tyče se namočí do rozměrné kadě s roztokem na několik dnů. Je důležité, aby tyče neměly malou vlhkost, neboť ochranná sůl vstupuje do hmoty pouze díky osmóze a ta funguje pouze tehdy, když mají vlákna určité procento vody. Pro ochranný roztok můžeme vybírat z mnoha přípravků od siřičitanu měďnatého  $\text{Cu}(\text{SO}_4)$ , dichromanu sodného  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , chloridu zinečnatého  $\text{ZnCl}_2$  až po pentaborát (5% boraxu a 5% kyseliny borité), který je výhodný díky své nízké ceně a náročnosti na životní prostředí.
- **Konzervace injektáží:** Injektáž se provádí pro každý článek zvlášť. Článek se musí navrtat a napustit 10ml až 20ml konzervační látky. Přičemž se musí dbát na dokonalé injektáži každého článku a konečném zapečetění článku. Jde o pracnou metodu a obecně se nedoporučuje.
- **Konzervace pod tlakem:** Efektivní ale drahá metoda, při které se do stěny bambusu vhání konzervační látka pod vysokým tlakem. Nazývaná někdy též jako "Boucheriova metoda". Za posledních 20 se velice zdokonalila.
- **Ochrana povrchu:** Aby se předešlo rozpadu a znehodnocování povrchu ultrafialovým zářením nebo deštěm natírá se lněným olejem nebo včelím voskem. Vhodné jsou také olejné nátěry běžně používané pro dřevo.
- **Protipožární nátěry:** Můžou se použít nátěry, které jsou běžné u dřevěných konstrukcí.

Materiál bambusu je hydroskopický, proto musí být vhodně skladován, tak aby se předešlo zbytečnému nasáknutí vodou. Navlhčená tyč ztrácí své mechanické vlastnosti a snáze degraduje. [1]

## 2.7 Výtěžnost bambusu a pozitivní ekologické dopady na životní prostředí

Výtěžnost bambusu je jedna z největších vůbec mezi pěstovanými biomasami. Avšak závisí na



mnoha faktorech. *Guadua angustifolia* dosahuje výtěžnosti 100t za hektar za 6 let, ale může za určitých podmínek dosahovat produkce až 594.2 t za hektar za sedm let. Průměrně tak produkce je 5,8 krát větší než u obyčejné dřevěné biomasy. Pěstování bambusu probíhá mnohem plynuleji než je tomu u lesů tvořenými například smrky. V bambusovém háji se vždy sbírají pouze zralé kusy a ostatní se nechají netknuté. Těžba neprobíhá způsobem, kdy se vytěží celý pás. Proto bambus představuje mnohem potenciálnější obnovitelný zdroj biomasy, než je tomu u jiných dřevin.

Pěstování bambusu také přispívá okolnímu životnímu prostředí. Díky husté bambusové kořenové soustavě omezuje proces eroze. Vysoký obsah vody v bambusovém pletivu dělá z bambusových hájů velké rezervoáry vody. Jeden hektar dokáže uchovat 30 000 l vody. Voda je během období dešťů akumulována, proto pomáhá vytvořit stálou vlhkost a teplotu v bambusovém háji i přes období sucha. [10]

Bambus patří také mezi rostliny, které by mohly být významným nástrojem pro snižování obsahu  $\text{CO}_2$  v ovzduší. Bambus roste mnohem rychleji než strom a proto také dokáže pojmout více  $\text{CO}_2$ . Za šest let růstu jeden hektar dokáže pro svou fotosyntézu absorbovat až 56 t  $\text{CO}_2$ .

U problémů s odpadními vodami může být bambus také nápomocen. Existují tři metody čištění vod: primární, sekundární a terciální. Systém bambusových kořenů může ulehčit druhé metodě čištění vody za pomoci biochemické reakce. Pomáhá tak pročišťovat spodní vody od různých ve vodě rozpuštěných nečistot.

Kromě výše zmíněných výhod, bambusový háj a jeho ráz příjemně obohacuje krajinný ráz (viz obr.7) a oblasti, které jsou intenzivně obhospodařovány. Vytváří příznivé prostředí pro faunu a flóru a představuje způsob jak propojit šetrnost k přírodě s jejím využíváním. To však platí pro oblasti, kde přirozeně rostou a mají své místo v ekosystému. [1]



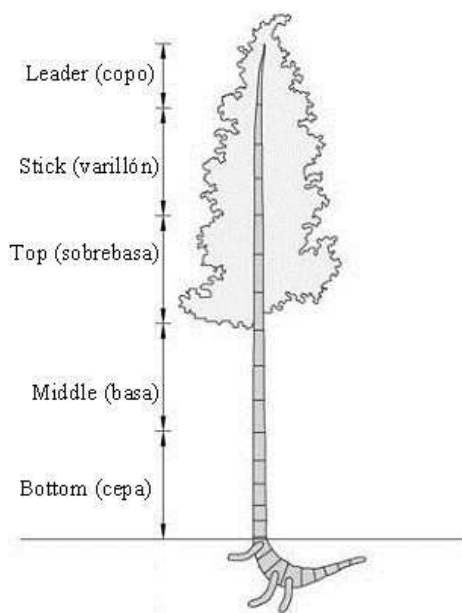
**Obr.7:** Ilustrace bambusového háje [10]



### 3. Použití bambusu

Pro své skvělé mechanické vlastnosti, dobrou ohebnost, rychlý růst, nízkou hmotnost a nízké náklady je bambus materiálem mnoha použití. Odhaduje se, že jedna miliarda lidí žije v domech postavených z bambusu. Například v Bangladéši žije v takto postavených domech přes 70% populace, v hlavním městě Ekvádoru 50% populace. V zemětřesných oblastech je použití bambusu výhodou pro jeho flexibilitu a nízkou hmotnost. V tropických oblastech, kde je místní dostupnou rostlinou, je nejpoužívanější stavební materiál. Velice vhodný je pro dočasné stavby, jako je lešení budov. Bambusové lešení snese bez problému výšku čtyřiceti pater. Další použití pro oblasti kde roste běžně jsou pro výroby každodenní potřeby, hudební nástroje, nábytek. Nově jsou taky experimenty s výrobou cyklistických kol, nosné konstrukce automobilů nebo autobusů. V Asii se mnoho rozmáhá využití bambusu pro laminátové nebo kompozitní materiály. V Indii kolem roku 1910 se bambusová buničina používala k výrobě papíru. Thomas Edison zase vlákno z japonského bambusu testoval pro své žárovky a ukázal se jako nejlepší materiál s výdrží svítit po 2450 hodin. Vidíme, že bambus dokáže být užitečný nejen ve stavebnictví. Může nás provázet ve všech možných aspektech života. To dělá z této rostliny nejen zdroj materiálu pro mnohostranné použití, ale také skutečný symbol ochrany a šetrnosti k přírodě. [1]

Mechanické vlastnosti bambusového stébla nezávisí pouze na jeho stáří, ale také na pozici na stéblu. Nejhornější a nejslabší část rostliny je vhodná pouze jako krytina střech prostých obydlí (viz obr.8). Pro stavební účely se používá pouze střední část. Nejžádanější jsou spodní části, které dosahují nejlepších mechanických vlastností. [10]



**Obr.8:** Používané části stonku[10]

### 3.1 Základní vyráběné díly

- **Bambusová tyč:** Stéblo rostliny zbaveno všech větví, listů a oddenku, které je připraveno pro použití v nosných nebo nenosných částí konstrukce. Nejčastěji jde o nosníky, sloupy, příhradové nosníky, nenosné výplně a další. Běžně se prodává po délkách 6m v průměrech 6-8cm, 8-10cm, 10-12cm, 12-14cm.
- **Bambusové rohože:** Získávají se ze střední části stonku, který se rozštípné sekerou, otevře a vytvaruje do roviny. Je podstatné, aby tyče měly svoji vegetační přirozenou vlhkost. Po rozštípnutí se musí vnitřní měkká část bambusu vyškrábat. Je to ta část, která je bohatá na obsah škrobu a je proto přitažlivá pro hmyz. Poté se ošetřuje ponořením do nádrže s konzervačním roztokem a nechá se sušit na slunci po dobu jednoho až dvou měsíců. Rohože se mohou použít ve své přirozené podobě nejčastěji pro vnější obvodový plášť prostých staveb nebo vnitřní příčky. Mohou se dále upravovat lepením, broušením, stlačováním na výrobky se specifickými funkcemi. Vhodné jsou pro nábytek, kompozitní nosníky, podlahy, desky, podhledy, příčky atd. (viz obr.9). Lepené nosníky dosahují ohromujících výsledků. Rohože se prodávají v podélném rozměru čtyř metrů.



**Obr. 9:** Příklady výrobků bambusových rohoží [10]

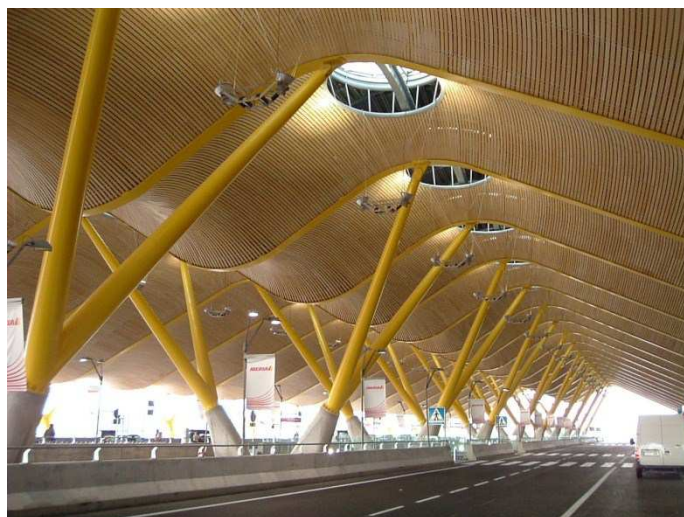
- **Bambusové latě:** Jsou to segmenty tyče, nařezané podélně s vlákny. Poté se spojují k sobě a vytvářejí kompozit. Běžné použití je pro lavičky nebo stoly.
- **Bambusové pásečky:** Princip výroby u pásečků je stejný jako u latí. Šířka pásečků je však 1cm. Dají se dobře ohýbat a tvarovat. Jsou vhodné pro výrobu košů a různých pletiv.
- **Laminátové tabule:** Alternativa k běžným dřevěným překližkám. Jsou skládány z jednotlivých latí, které jsou vyřezány z bambusového stébla a mají obdélníkový průřez nebo se můžou zhotovovat z výše zmíněných bambusových rohoží. Skládají se z tří až pěti 5mm vrstev spojených k sobě fenolformaldehydovým nebo močovinoformaldehydovým lepidlem někdy za pomoci vysokého tlaku a teploty. Výsledný materiál může dosahovat vysoké hustoty až  $1200\text{kg/m}^3$ .

Tabule vykazují následující parametry: -pevnost v tlaku  $f_{c,0,k}=48\text{ Mpa}$

-pevnost v tahu  $f_{t,0,k}=132\text{ Mpa}$

-modul pružnosti  $E_{0,\text{mean}}=19\,137\text{ Mpa}$

Bambusové laminátové výrobky mají vysoký potenciál pro použití ve stavebnictví díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem a možností výrobky tvarovat. Kromě toho zahrnují v sobě hlavní výhodu laminátů, u kterých se eliminují velké výkyvy imperfekcí a lze se na materiál více spolehnout. Příklad použití je demonstrován na obr. 9. Jde o dílce v šířce 10cm pro vytvoření oválně tvarovaných stropů. Z laminátových elementů jsou dále vyráběny desky, tabule, sloupky, trámy, panely, příčky a jiné (viz obr. 10). [1]



**Obr.10:** Terminál T4 Madridského letiště Barajas [10]



**Obr.11:** Bambusové laminátové panely a příčky [10]

### 3.2 Obecné požadavky a vlastnosti bambusu pro konstrukci

#### 3.2.1 Výhody bambusu

- Vysoký poměr pevnosti-hmotnosti v porovnání v obyčejnými dřevěnými materiály.
- Vysoká výtěžnost oproti obyčejným dřevinám a absorpce CO<sub>2</sub>.
- Bambusové tyče neobsahují žádné imperfekce ve formě suků.
- Sklizeň a pěstování a zpracování je nízkonákladové.

#### 3.2.2 Nevýhody bambusu

- Mechanické vlastnosti se můžou lišit v závislosti na druhu, místě růstu, stáří, vlhkosti a části stonku.
- Výsledky laboratorních testů, se můžou pro různé variace bambusových vzorků lišit ve svých mechanických vlastnostech několikanásobně.
- Bambus je citlivý na ultrafialové záření, déšť, houby, plísňe nebo hmyz. Nutnost ochrany proti takovýmto degradačním činitelům je nepostradatelná a nesmí se v žádném případě zanedbat. Proto je nutné materiál chránit jak při manipulaci s tyčemi nebo při výrobě a montáži, tak i při užívání konstrukce.
- Kruhový průřez a náchylnost k praskání může snadno zkomplikovat detaily nebo spoje. Řešení spojů je velkou kapitolou a může nabývat všelijakých podob od prostých spojů až po sofistikované metody spojování za pomoci ocelových kloubů a přípojek.
- Musíme počítat s proměnlivým průřezem. Průměr a tloušťka stěny se mění podélně se stéblem. Stéblo málokdy roste přesně napřímo. Tvarové imperfekce budou vždy přítomny.

#### 3.2.3 Výběr bambusových tyčí pro konstrukci

Tyče použité v konstrukci musí být dobré kvality a musí splňovat následující požadavky:

- Bambusové stonky musí být zralé a suché
- Nesmí být použity tyče, u kterých jsou praskliny ve stěně probíhající přes koleno do dvou článků.

- Tyče mohou být jemně vykřiveny po své délce, nesmí však být lokálně vyhnuté. Sloupy přenášející tlakové síly nesmí mít excentricitu přesahující 0.33% délky elementu.
- Tyče napadené plísněmi, houbami nebo hmyzem ve vyšším stupni degradace nesmí být použity.
- U sloupů se doporučuje použít spodní třetinu stonku bambusu, kde je tloušťka stěny největší a kolena jsou na sebe nejvíce nahuštěna.
- Praskliny u nosníků nesmí probíhat v okolí neutrálné osy. Pokud tyč nějaké praskliny má, tak se musí nacházet na spodní nebo horní části.
- Abychom se vyhnuli napadení škůdci, musíme udržovat relativní vlhkost tyče pod 20%. [10]

### 3.3 Řešení detailů

- Je velice nutné konstruovat dostatečně velké okapy a sokly výšky alespoň 30-50cm, tak aby se konstrukce nedostala do kontaktu s deštěm a zeminou. Konstrukce v kontaktu se zeminou velice rychle degraduje. Pokud jsou některé části vystaveny dešti, musíme je překrýt buď deskami, střechem nebo aplikovat nátěr.
- Je třeba se vyvarovat podélné řadě za sebou jdoucího dírkování, tak aby nevznikaly podélné praskliny.
- Detail konce tyče položeného na beton je problematický. Když je zde přítomný déšť, voda může být nasávána vlákny bambusu. Proto lepší řešení je buď tyč přímo zapustit do betonu nebo tyč se základem spojit prostřednictvím železné stojky.
- Konečné články nesmí být opatřeny kolíkovými spoji.
- Spoje určené pro přenos sil musí být provedeny precizně. Stěny a hrany bambusu musí doléhat na sebe přesně a celou plochou, tak aby se minimalizoval podíl přenosu kolíkovými spoji.
- Není doporučováno používat parotěsné nátěry. Jestliže vlhkost pod nátěrem zkondenzuje, tak zároveň oblast nabobtná a začne se porušovat.
- Tyč musí být zakončena přepážkou. Pokud zde není, tak minimální vzdálenost nejbližší přepážky musí být minimálně 12cm. Konec může být opatřen svěracím páskem jako prevence proti rozštípnutí konce. [10]

### 3.4 Bambus v Evropě

Do konce 20. století se použití bambusu týkalo pouze domácího vybavení, nábytku a dekorací. Za poslední léta, s tím jak se zlepšila technologie laminování, se velice rozšířilo používání bambusových podlah.

V Evropě zatím není tradice používání bambusu pro stavební konstrukce rozšířená. Velký bod zvratu nastal v roce 2000 na světové výstavě EXPO v Hannoveru, kde byl vystaven pavilon ZERI, navržen Simónem Vélezem. Od této doby bambus je stále větším lákadlem pro architekty a projektanty, kteří se snaží o originální, exotické a odvážné stavby. O deset let později na světové výstavě EXPO v Šanghaji se pro výstavbu pavilónů použil opět bambus, ale nyní už jako plně uznávaný a seriózní stavební materiál.

V Evropě kromě několika málo bambusových pěstíren prozatím neexistují žádné stále plantáže. Nejlepší bambusový stavební materiál pro Evropu představuje *Guadua Angustifolia* importována z Kolumbie. Ačkoliv doprava bambusu z Kolumbie do Evropy se zdá být finančně a ekologicky



náročná, tak i přes to musíme uvážit, že pro sklizeň a zpracování je vynaloženo velice malé množství energie a úsilí. Díky se nízké hmotnosti se stávají i daleké transporty méně náročné v porovnání s běžně používaným dřevem. [1]

### 3.5 Normy

V současné době neexistují v Evropě žádné platné normy zabývající se bambusovými konstrukcemi. Jelikož bambus není certifikovaným materiálem, musí se ke každé stavbě přistupovat velice individuálně. Ve většině případů bambus jako konstrukční materiál bývá schvalován na základě laboratorních testů, kde jako podklad můžou sloužit některé zahraniční normy. Nejrozsáhlejší a nejpropracovanější normy týkající se bambusu *Guadua angustifolia* jsou kolumbijské národní normy, v kterých můžeme najít například normu ISO 22157-1:2004. Norma popisuje měření a vyhodnocování zkoušek vlhkosti, hustoty, smršťování, tlakové a tahové zkoušky, ohybové a smykové zkoušky. Některé kolumbijské normy zahrnují zesilování bambusových staveb proti zemětřesení (NSR-10), sklizení, sušení, ochranu (NTC5300 a 5301), konstrukce spojů (NTC 5407) a další. Norma ISO 22156:2004 řeší problematiku vybraných částí v konstrukci. [1]

### 3.6 Hořlavost

Dutá tyč představuje vážné požární riziko. Nicméně povrch je pokryt vrstvou křemičitého povlaku, který hořlavost dramaticky snižuje. Testy provedeny pro projektování obvodového pláště automobilového parku v německém Lipsku ustanovila bambus podle normy DIN4102 jako mírně hořlavý (třída B2). Proto nejsou vážné důvody pro další zvětšování protipožární odolnosti bambusových konstrukcí, avšak je nutné oddělovat od sebe navzájem jednotlivé požární úseky v patrech betonovou podlahou. [1]

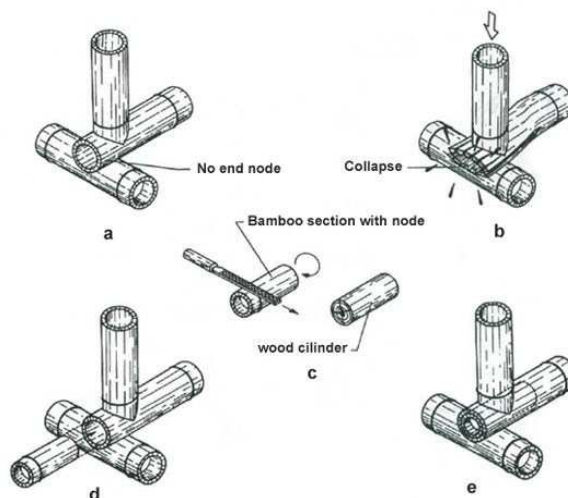
### 3.7 Spoje

Spoje u bambusových konstrukcí představují zásadní problém. Kvůli kruhovému průřezu a striktně podélnému uspořádání vláken mezi koleny spoje nemůžou být řešeny jako u běžných dřevěných konstrukcí. Dále se potýkáme s problémem proměnného průřezu, proměnných vzdáleností mezi koleny a různých tvarových imperfekcí. Než bude bambus přijat jako standardní a moderní stavební materiál musí být otázka spojů vyřešena tak, aby je bylo možno používat co nejuniverzálněji. Musí splňovat kritérium spolehlivosti, životnosti a v neposlední řadě musí mít nízké nároky na údržbu a musí být snadno montovatelné a finančně hospodárné. V současné době existuje široký sortiment jak tradičních tak moderních spojů. [10]

U spojů by se měly dodržovat následující zásady:

- Děrování pro kolíkové spoje musí respektovat osu tyče. Průměr musí být vždy o 1,5mm větší než průměr spojovacího kolíku.
- Obecným a důležitým pravidlem je používání pouze vysušených tyčí bez prasklin. U zelených tyčí by hrozilo po vysušení smršťování, které by vedlo k uvolňování spojů.
- Je vhodné využívat přepážek, jako nejpevnějších míst. U dvou na sebe kolmých spojovaných prvků, kde působí velké tlakové síly, je přepážka důležitým zpevňovacím prvkem. Pokud chybí,

musí být do tyče vložena výztuha ve formě dřevěné kulatiny nebo jiného kousku bambusu jinak by hrozilo porušení prvku (viz obr. 12).



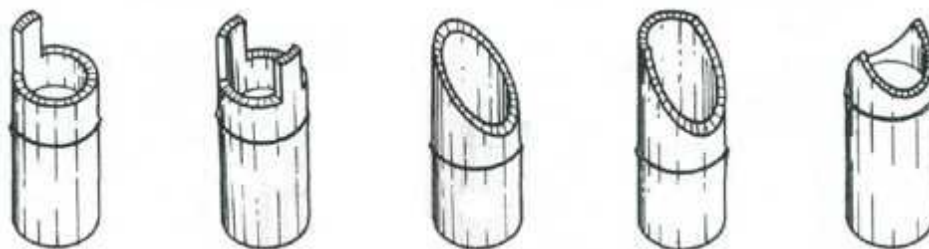
**Obr. 12:** Vyztužování spojů[10]

- U prvků, které jsou spojeny pomocí kolíku a jsou namáhány velkými silami je nutné články vyplnit výplňovou hmotou nejčastěji cementovou zálivkou s příměsí plastifikátorů, tak aby se snadno vyplnil celý prostor článku. Musíme mít na paměti, že při tuhnutí a tvrdnutí cementové zálivky dochází k jejímu smršťování a může se tedy mezi zálivkou a stěnou bambusu vzniknout prostor. Z těchto důvodů se nedoporučuje, jak je zmíněno v některých zdrojích, používat směs cementu a písku v poměru 1:2. Směs cementu a hrubozrnného písku se zrnny do 4mm v poměru 1:4 pomáhá omezit nežádoucí smršťování. Druhou možností jsou epoxidové pryskyřice s přidaným pískem. Otvor, kterým výplň dovnitř aplikujeme, nemá mít rozměry větší než 2,5cm nebo by se mohla narušit integrita stěny. Po aplikaci se díra zpět zalepí.
- U prvků namáhaných na tah nesmí být vzdálenost kolíků menší než 150mm a větší než 250mm u prvků namáhaných tlak vzdálenost nesmí být pod 100mm.
- Pokud je třeba konec tyče vyztuzit proti prasknutí, používají se lana ze syntetických vláken nebo galvanizované dráty.
- Podle Kolumbijských norem může být použit jakýkoliv typ spoje, pokud bude úspěšně ověřen minimálně 20 pokusy laboratorním zkoušením. [10]

### 3.7.1 Tradiční spoje

Tradičních spojů existuje celá řada. Zde bude zmíněn pouze nejužší výběr, aby bylo možno demonstrovat základní principy. Nejčastěji jsou spojovány prostým způsobem pomocí provazů, kolíků nebo kůže, u které po vysušení dochází ke smršťování a dotahování. Všechny detaily jsou prováděny a dotahovány ručně za pomoci ručních klasických nástrojů. Tradiční spoje bývají místem největšího zeslabení konstrukce a velkých deformací. [1]

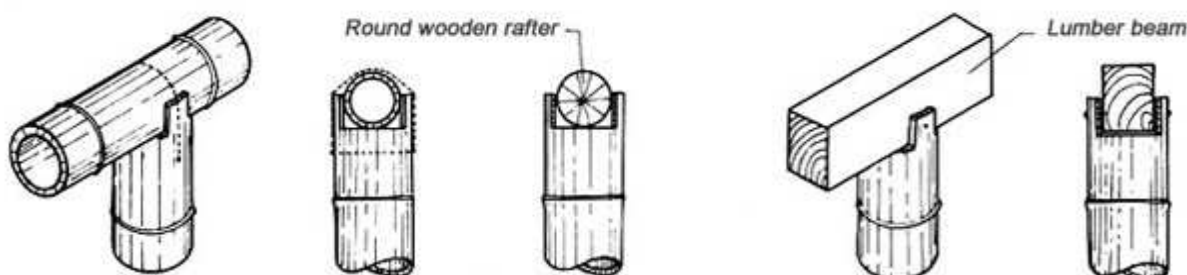
Pro přenos sil z jednoho prvku na druhý je důležité zakončení prvku do vhodného tvaru, tak aby kontaktní plocha prvků byla co největší. Přehled je znázorněn na obrázku 13.



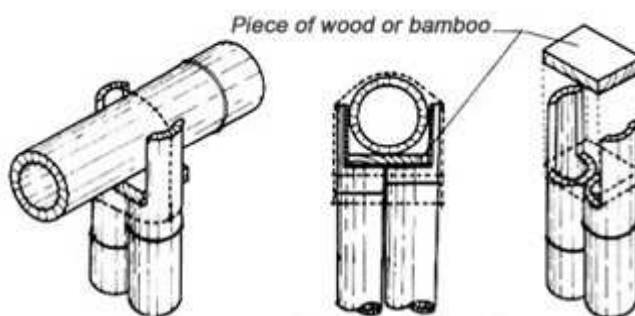
**Obr.13:** Z leva: konec s jedním, s dvěma uchy, šikmé a flétnové zakončení, rybí ústa[10]

Druhy spojů: [10]

- Spojování svislých nosných prvků (sloup) a horizontálních nesených prvků (trám) (viz obr 14). Horizontální spoj drží za pomoci uší. Pro mohutnější horizontální prvky se může svislý bambus zdvojit (viz obr. 15).



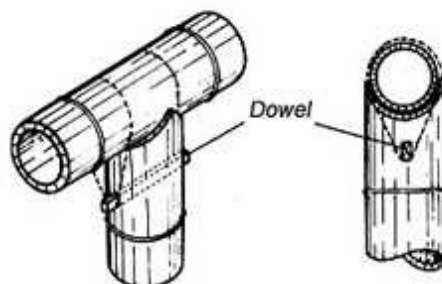
**Obr. 14:** Spojování svislých a horizontálních prvků[10]



**Obr. 15:** Spoj zdvojeného svislého prvku[10]

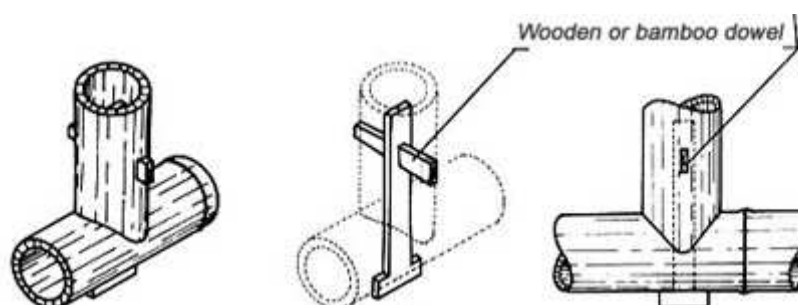
- Spojování lípnutím dvou prvků za pomoci kolíku a vázání (viz obr.16). Svislý prvek je vyřezán do tvaru tzv. rybích úst, aby nesený prvek měl co největší kontaktní plochu s horizontálním prvkem.





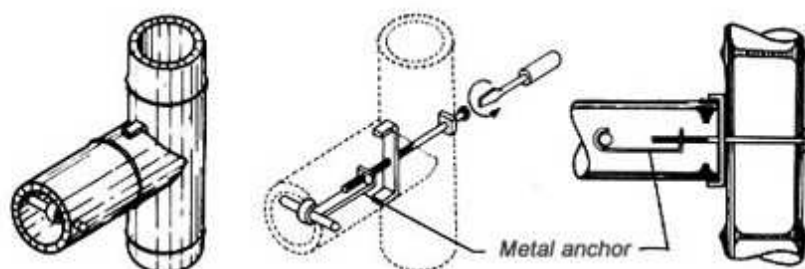
**Obr. 16:** Spoj lípnutím[10]

- Spoj lípnutím pomocí kotev (viz obr. 17).



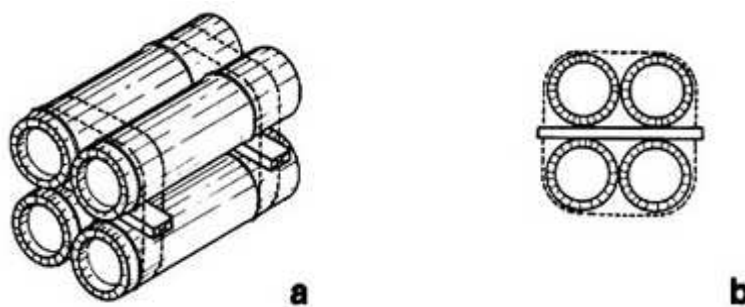
**Obr. 17:** Spoj pomocí kotev[10]

- Spoj pomocí ocelových kotev (viz obr. 18). Pro tento způsob existuje celá řada variací.



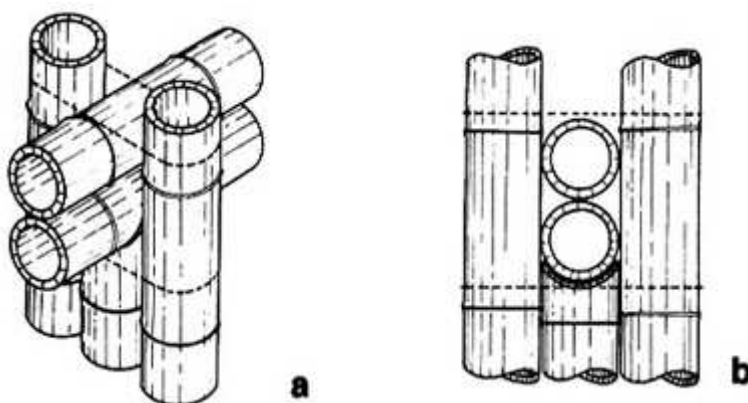
**Obr. 18 :** Spoj pomocí ocelových kotev[10]

- Znásobování počtu tyčí v jednom nosném prvku (viz obr. 19). Horní a spodní pás je od sebe oddělen dilatační podložkou.



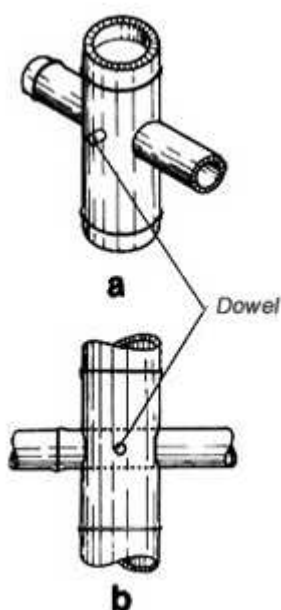
**Obr. 19:** Znásobení tyčí v nosníku[10]

- Jiný způsob znásobování tyčí. Tento způsob je hojně využíván při stavbě pozemních staveb nebo mostů (viz obr. 20).



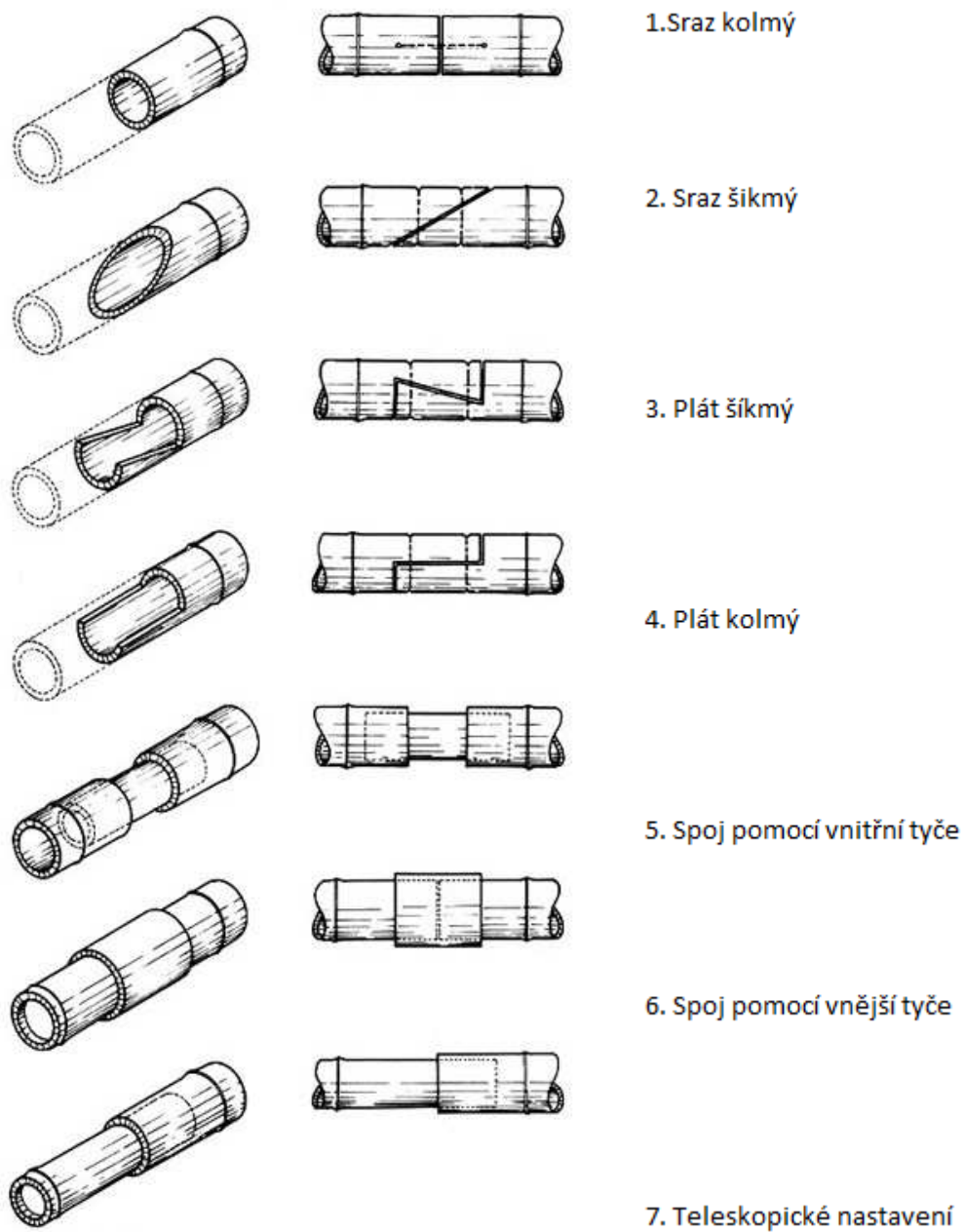
**Obr. 20:** Znásobování tyčí[10]

- Křížové napojení prvků (viz obr. 21).



**Obr. 21:** Křížový spoj[10]

- Nastavování dvou bambusových tyčí (viz obr. 22).



**Obr. 22:** Nastavování bambusových tyčí[10]

### 3.7.2 Moderní spoje

- Dnes se u spojů, kde je potřeba lan, preferují lana syntetická nebo běžněji galvanizované dráty.
- U spojů s ocelovými kotvami se můžou pro lepší roznos sil použít tvarované ocelové závěry vyvinuté Marceloem Villegasem (viz obr. 23). [1]



**Obr. 23:** Závěrné spojovací destičky [1]

- Spoje, u kterých konce tyčí nejsou nijak upravovány mohou být řešeny podle obrázku 25. Řešení navrhnul Marcelo Villegas. [1]



**Obr. 24:** Nastavitelný spoj[1]

- Jiná řešení pro kontaktní zónu spojů vyvinul Adán Piza (viz obr. 25). Pryžové tvarované vložky kopírují povrch bambusových tyčí. [1]



**Obr. 25:** Pryžové vložky[1]

- Elegantní řešení styčnickových spojů za pomoci ocelové koule, do které se připojují prvky je znázorněno na obr. 26. Řešení navrhnul Tim Obermann. [1]



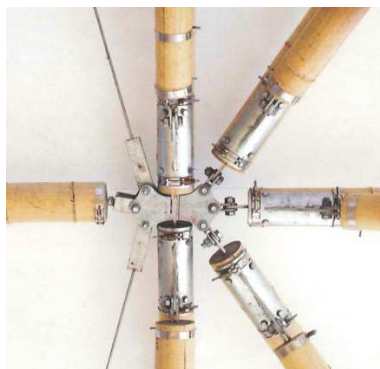
**Obr. 26:** Spoj s koulí[1]

- Problém u styčnicků, které je potřeba prostorově nastavit vyřešil Vitor Marcal (viz obr. 27). Spoj však postrádá vysokou tuhost. [1]



**Obr. 27:** Nastavitelný spoj[1]

- Sofistikovanější metody spojů, které byly provedeny u německého pavilonu Markusem Heinsdorffem na výstavě EXPO 2010 v Číně jsou znázorněny na obr. 28. Výhodou je vysoká tuhost a prostorová nastavitelnost. [1]
- 



**Obr. 28:** Spoj podle Markuse Heinsdorffa[1]

- Velice jednoduchý ale málo tuhý spoj je znázorněn na obr. 29.



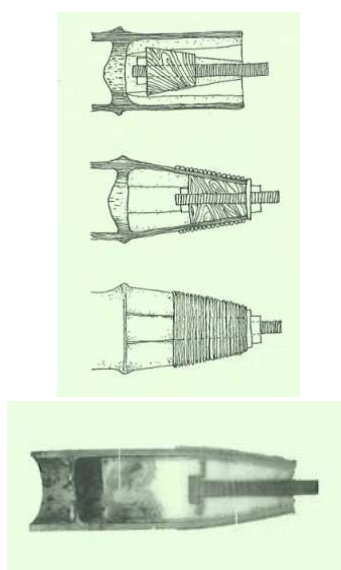
**Obr. 29:** Spoj[1]

- Velice vhodné spoje „BAMBOOTIX“, kde nemusíme tyče narušovat předvrtáním, navrhnul Waldemar Rothe. Spoj je také výhodný svou rychlou instalací. [1]



**Obr. 30 :** Spoj BAMBOOTIX[1]

- V roce 1941 C.H. Duff navrhnul kónický spoj (viz obr. 31). Toto řešení, je velice únosné u prvků namáhaných na tah. Při aplikaci se nemusí předvrtávat ani jinak oslabovat. Do článku je umístěna tyč a článek je následně vyplněn cementovou nebo pryskyřičnou výplní. [1]



**Obr. 31 :** Kónický spoj dle C.H. Duffa[1]



- Americká firma KOOLBamboo vyvinula pro vysoce zatěžované klouby spoj, který je zobrazen na obr. 32. [1]



**Obr. 32:** Spoj KOOLBamboo[1]

### 3.8 Mechanické vlastnosti

Bambus je materiál mimořádně pevný, lehký a pružný díky svému kruhovému průřezu a dutému stonku. V porovnání s plnou kulatinou bude dutý bambus vykazovat lepší pevnost v ohybu.

Pevnost vláken v průřezu se směrem ze středu k okrajům postupně zvětšuje. Na povrchu je bambus pokryt vrstvou pevných křemíkových vláken. Vnější vrstva dokáže odolat tahovému napětí o hodnotě 400 MPa. Takováto kompozitní struktura průřezu dodává bambusu jeho úžasné pevnostní vlastnosti. Když ale však mluvíme o celkovém průřezu, tak pochopitelně pevnosti průřezu nejsou tak vysoké. Pro názornost hodnoty pevnosti v tahu  $f_{c,0,k}$  vnitřní a vnější stěny jsou ukázány v tabulce 1.

	Tyč, průměr d=80mm	Tyč, průměr d=30mm
Vnější vlákna	Min 306,8MPa	357,4MPa
Vnější vlákna	Max 327,3Mpa	384,3Mpa
Vnitřní vlákna	Min 135,3Mpa	148,4MPa
Vnitřní vlákna	Max 163,3MPa	194,7MPa

**Tabulka 1:** Porovnání pevností vnitřních, vnějších vláken a tyčí různých průměrů[2]

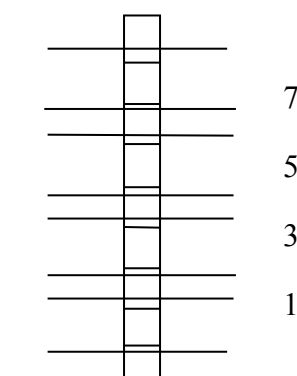
Při určování pevnosti tyče záleží mnoho na podmínkách testování. Velice také záleží na štíhlosti  $\lambda$  testované tyče. U štíhlých prvků se bude projevovat vzpěr. Závislost pevnosti v tlaku na štíhlosti je popsána v tabulce 2. Pro srovnání poslední hodnota je pevnost v tahu.

Štíhlost $\lambda$	Pevnost v tlaku
10	5,6 MPa
56	3,9 MPa
86	2,7 MPa
tah	9,5 MPa

**Tabulka 2:** Výsledky testů firmy FMPA ve Stuttgartu[10]

Pevnosti jsou u bambusů velice proměnlivé a výsledky měření se velice liší. Záleží na mnoha faktorech, jako jsou stáří, vlhkost, oblast pěstování, podmínky sběru, škůdci, druh bambusu a zejména záleží na části stonku. Průřez tyče nebývá stejný po celé délce, ale mění se. Větších pevností dosahuje ve spodní oblasti stonku. Také tato část bývá více žádána. Závislost mechanických vlastností a části stonku znázorňuje následující tabulka 3. Testovaný druh je *Dendrocalamus giganteous*.

Pořadí článku	Modul pružnosti E[MPa]	Pevnost v tlaku[MPa]	Pevnost v tahu[Mpa]
1	17,2	60,2	183,6
3	12,2	61,9	194,6
5	14,7	64,0	188,0
7	13,0	64,6	196,6
průměr	14,3	62,7	190,7

**Tabulka 3:** Mechanické vlastnosti v závislosti umístění článku ve stonku[1]**Obr. 33:** Pořadí testovaných článků. Každý článek obsahuje 2 kolénka.

Průřez o vyšším průměru nemá v poměru ke své průřezové ploše takovou pevnost jako tyče o menších průřezích. Je to způsobeno tím, že starší a větší tyče nemají tak silnou vnější křemíkovou vrstvu, která je tak důležitá pro pevnostní vlastnosti. Proto také vzorek  $d=30$  mm v tabulce 1 vykazuje vyšší E a  $f_{c,0,k}$  než vzorek s průměrem  $d=80$  mm. Avšak po vynásobení s průřezovou



plochou bude celková únosnost v části 1 větší než v části 7. [1]

Výčet materiálových charakteristik:

- Hodnoty  $f_{c,0,k}$  se pohybují od 40MPa do 80MPa, což je stále minimálně dvakrát vyšší hodnota než u konvenčních dřev.
- Hodnoty modulu pružnosti  $E$  můžeme vyčíst z tabulky 4. Hodnoty byly měřeny pro druh *Guadua angustifolia*. Pro srovnání vysokopevnostní dřevo C50 má modul pružnosti  $E=16$  MPa. Bambus obecně lépe snáší tahové napětí, kde má vyšší modul pružnosti a pevnost. V tlaku na pevnost negativně působí vysoká štíhlost prvků

E(tlak)	18,4MPa
E(ohyb)	17,9MPa
E(tah)	20,7MPa
průměr	19,55MPa

**Tabulka 4:** Modul pružnosti pro Guaduu[2]

Z experimentů byla zjištěna závislost mezi průměrem bambusové tyče a modulem pružnosti  $E$  v tahu a tlaku, jak také znázorňuje tabulka 5. Existuje ideální poměr mezi rozměry a modulem pružnosti  $E$ , po jeho překročení mechanické vlastnosti v poměru s průměrem tyče klesají.

d=100mm	d=80mm	D=70
15,19MPa	18,9MPa	16,5MPa

d=90mm	d=80mm	d=70mm
17,00MPa	17,90MPa	14,00MPa

**Tabulka 5:** Znázornění závislosti modulu pružnosti na průměru tyčí[10]

- Pokud jde o pevnost ve smyku, tak i zde bambus dvakrát předčí pevnost běžných dřev. Průměrná pevnost ve smyku byla pokusy naměřena na  $f_{v,k}=8$ MPa. Smyková pevnost a její hodnota hraje klíčovou roli při navrhování spojů, kde je používáno kolíkových prvků.
- Pevnost v tahu se pohybuje od 90MPa po 380MPa, průměrně tedy 160MPa. V tahu bambus jednoznačně vyniká nad ostatním dřevem, kde dosahuje hodnot 10x vyšších.
- Pevnost v ohybu se pohybuje od 50MPa do 150MPa, průměrně tedy 100MPa a i zde hodnoty obvykle používaného dřeva sotva dosahují poloviny toho co bambus.

Elastická deformace způsobena ohybem je téměř minimální pohybující se mezi hodnotami  $1/25,9L$  až  $1/20,1L$ . Pokud je jakýkoliv průhyb nežádoucí, může se nosník před uložením ohnout do druhého směru a vnést tak do nosníku počáteční deformaci a tím vykompenzovat průhyb od zatížení. [1]

Snadná podélná štípatelnost v části článku mezi kolénky je způsobena striktně podélným rozdělením vláken. V části kolénka jsou podélná vlákna článku protkaná s vlákny kolénka, díky tomu se může případná podélná trhлина o kolénko zastavit. Energie šířících se trhlín se rovnoměrně rozloží podél trhlíny, proto je místo zatěžování méně poškozeno. Kolénka dodávají bambusu vyšší odolnost vůči tlaku, podélnému smyku, tlaku a tahu kolmo na vlákna. Výhodou u porušení je, že nedochází k žádnému spontánní porušení, jak je tomu u dřeva. V prvním stádiu se objeví praskliny pomalu rozšiřující se v tyči a až při dalším zatěžovacím stádiu dojde k úplnému kolapsu. [1]

-Maximální průhyb je doporučován na  $1/150$  maximální délky. [1]

## 4. Řešená konstrukce lávky

Konstrukce se bude řešit ve čtyřech krocích. Jako první se provede výpočet přístřešku včetně výpočtu zatížení, návrhu prvků a jejich posouzení. Dále bude následovat výpočet hlavní nosné konstrukce, jeho návrh a posouzení dle mezního stavu únosnosti. Třetí krok bude posouzení lávky dle mezního stavu použitelnosti. Začtvrté se provede dynamický výpočet a posouzení konstrukce na dynamické účinky.

### 4.1 Výpočet obecných účinků zatížení

- **Stálé zatížení**

Charakteristická hodnota vlastního zatížení tyčí

$$g_k = \rho \cdot A \cdot g = 650 \cdot 5,66 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 36,79 \text{ N} \rightarrow 0,037 \text{ kN/m}$$

Hodnota je vypočítána automaticky v software Scia Engineer.

Návrhová hodnota vlastního zatížení

$$g_d = g_k \cdot \gamma_F = 0,037 \cdot 1,35 = 0,050 \text{ kN/m}$$

- **Zatížení užité**

Norma [3] pro lávku předepisuje plošné zatížení  $5 \text{ kN/m}^2$  Loadmodelem 4, který představuje dav lidí.

Bezpečnostní součinitel zatížení  $\gamma_F = 1,5$

- **Zatížení sněhem**

Výpočet proveden dle normy [4]

Bezpečnostní součinitel zatížení  $\gamma_F = 1,5$

Sněhová oblast II (Ostrava)  $s_k = 1,0 \text{ kN/m}^2$

Součinitel expozice (typ krajiny – otevřená)  $C_e = 0,8$

Tepelný součinitel ( $\lambda < 1,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )  $C_t = 1,0$

Sklon střechy  $\alpha = 20^\circ$   $\mu = 0,8$

Charakteristická hodnota zatížení nenavátým sněhem

$$s_{k,1} = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,64 \text{ kN/m}^2$$

Navátý sníh

$$s_{k,2} = 0,5 \cdot s_{k,1} = 0,32 \text{ kN/m}^2$$

- **Zatížení větrem**

Výpočet proveden dle normy [5].

Bezpečnostní součinitel zatížení  $\gamma_F = 1,5$

Výška pochozí mostovky nad terénem  $z_1 = 5,8 \text{ m}$

Výška střešního hřebene nad terénem (referenční výšky)

$$z = z_2 = z_i = z_e = 9,05 \text{ m} > z_{\min} = 2 \text{ m}$$

Výchozí základní rychlost větru (větrná oblast II- Ostrava)  $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$

Základní rychlost větru

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 = 25 \text{ m/s}$$

Součinitel drsnosti  $c_r = k_r \cdot \ln \frac{z}{z_0} = 0,19 \cdot \ln \frac{9,05}{0,05} = 0,988$

Krajina s nízkou vegetací  $\rightarrow$  kategorie terénu II  $\rightarrow z_0 = 0,05 \text{ m}$

Součinitel terénu

$$k_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left( \frac{0,05}{0,05} \right)^{0,07} = 0,19$$

Součinitel ortografie  $c_0(z) = 1,0$

Charakteristická střední rychlost větru

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0,988 \cdot 1,0 \cdot 25 = 24,7 \text{ m/s}$$

Součinitel turbulence  $k_I = 1,0$

Intenzita turbulence

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln \frac{9,05}{0,05}} = 0,192$$

Maximální charakteristický tlak

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 = [1 + 7 \cdot 0,192] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 24,7^2 = 893,78 \text{ N/m}^2 \rightarrow 0,893 \text{ kN/m}^2$$

## 4.2 Statický výpočet přístřešku

U přístřešku se provede návrh a posouzení střešní krytiny, vaznic a krokví dle mezního stavu únosnosti.

### 4.2.1 Výpočet krytiny

#### Střešní krytina - trapézový plech

Návrh: Trapézový plech TR 100/275/1 – negativní poloha

$$\gamma_k = 0,12 \text{ kN/m}^2$$

Trapézový plech bude sloužit jako podklad pro bambusové rohože.

#### **Výpočet viz přílohu 1 (3.1 Výpočet krytiny)**

Posouzení s tabulkovými hodnotami firmy Kovové profily [9]

- Kombinace s tíhovým zatížením

$$\text{MSP: } q_k = 2,38 \text{ kN/m}^2 < q_{Rk} = 47,40 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \textbf{Vyhovuje}$$

$$\text{MSÚ: } q_{Ed} = 3,13 \text{ kN/m}^2 < q_{Rd} = 10,48 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \textbf{Vyhovuje}$$

šířka vnitřní podpory min. 80 mm, šířka krajní podpory min. 40 mm

- Kombinace se zatížením větrem

$$\text{MSÚ: } q_{Ed} = 2,57 \text{ kN/m}^2 < q_{Rd} = 11,89 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \textbf{Vyhovuje}$$

### 4.2.2 Vaznice

Návrh: Bambusová tyč TR 80x7,3

Jsou umístěny na krokách, v každé střešní rovině 4x s osovou vzdáleností 800 mm. Vaznici uvažujeme jako spojitý nosník o dvou polích s délkou 3,5 m.

### Výpočet viz přílohu 1 (3.2 Výpočet vaznice)

#### Výpočet vnitřních sil a napětí

Výsledné ohybové momenty

$$M_{Ed,y} = -4,45 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z} = -1,21 \text{ kNm}$$

Napětí od ohybu

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_{el,y}} = \frac{4,45 \cdot 10^3}{1,27 \cdot 10^{-4}} = 35,01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{Ed,z}}{W_{el,z}} = \frac{1,21 \cdot 10^3}{1,27 \cdot 10^{-4}} = 9,53 \text{ MPa}$$

#### Únosnost při dvojosém ohybu

Posudek dle [7]

$$k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1 ; k_m = 1 \text{ (pro kruhové průřezy)}$$

$$1 \cdot \frac{35,01}{53,85} + \frac{9,53}{53,85} = 0,82 < 1 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

$$\frac{35,01}{53,85} + 1 \cdot \frac{9,53}{53,85} = 0,82 < 1 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

### 4.2.3 Krokev

Návrh: Bambusová tyč 1x TR 120x17,6

Podrobný výpočet viz přílohu 1 (3.3 Krokev).

#### Průřez v místě maximálního ohybového momentu

Prut bude posouzen na kombinaci vzpěrného tlaku a ohybového momentu.

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{56}{1,3} = 38,77 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} < 1$$

$$\frac{1,87}{0,744 \cdot 38,77} + \frac{8,19}{69,23} = 0,18 < 1 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

### **Průřez v místě maximálního záporného ohybového momentu**

Prut bude posouzen na kombinaci ohybového momentu a prostého tlaku v místě osedlání krokve.

Posudek

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}}\right) = \left(\frac{1,70 \cdot 10^6}{38,77 \cdot 10^6}\right)^2 + \left(\frac{18,50 \cdot 10^6}{69,23 \cdot 10^6}\right) = 0,27 < 1 \text{ Vyhovuje}$$

### **Průřez v místě maximální normálové síly**

Prut bude posouzen na kombinaci ohybového momentu a prostého tlaku.

Posudek

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}}\right) = \left(\frac{1,87 \cdot 10^6}{38,77 \cdot 10^6}\right)^2 + \left(\frac{8,19 \cdot 10^6}{69,23 \cdot 10^6}\right) = 0,12 < 1 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

### **Průřez v místě maximální posouvající síly**

Vnitřní síly  $V_{\max} = 3,74 \text{ kN}$

Posudek na smyk

$$\tau_{v,d} = \frac{V_z \cdot S_y}{I_{y,osl} \cdot b_{(z)}} = \frac{3740 \cdot 7,9 \cdot 10^{-5}}{6,2 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 0,0176} = 1,35 \text{ MPa} < f_{v,d} = 5,05 \text{ MPa} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

## **4.3 Výpočet hlavní nosné konstrukce**

Pro lávku se vypočte stálé a proměnné zatížení. Pro vnitřní síly prutů se při výpočtu použijí bezpečnostní součinitele. Pro výpočet mezního stavu použitelnosti se bude počítat pouze s charakteristickými hodnotami zatížení. U dynamického výpočtu se použije modální analýza. Výpočty budou prováděny v programu Scia Engineer.

### **4.3.1 Statický výpočet nosné konstrukce**

#### **Výpočet zatěžovacích stavů**

Na lávku bude působit stálé zatížení od vlastní tíhy konstrukce. Proměnné zatížení bude určeno větrem působící na přístřešek a pochozí vrstvu, sněhem působící na přístřešek a užitným zatížením

působící na pochozí vrstvu.

- Stále zatížení

Vlastní tíha konstrukce příhradové je určena automatickým výpočtem v programu Scia engineer.

Vlastní tíha přístřešku je určena jako záporná reakce vlastní tíhy při výpočtu krokve v kap. 4.2.3.

$$R_k = F_k = 0,35 \text{ kN}$$

Vlastní tíha pochozí vrstvy – laminátové tabule:  $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ , tl. 22mm  
 $\gamma_k = 1200 \cdot 10 \cdot 0,022 = 0,26 \text{ kN/m}^2$   
 Zatížení do jednoho uzlu  $F_k = 0,26 \cdot 3,5 \cdot 3 \cdot 0,5 = 1,37 \text{ kN}$

Vlastní tíha podélníků nesoucí laminátové tabule:  $p_k = A \cdot \rho \cdot g = 5,66 \cdot 10^{-3} \cdot 650 \cdot 10$   
 (osová vzdálenost 375mm  $\rightarrow$  7 podélníků na 1 příčnku)  $= 0,04 \text{ kN/m}$   
 Zatížení do jednoho uzlu  $F_k = p_k \cdot 3,5 \cdot 7 \cdot 0,5 = 0,04 \cdot 3,5 \cdot 7 \cdot 0,5$   
 $= 0,49 \text{ kN}$

- Zatížení sněhem

Zatížení sněhem určeno jako akce vyvozené ze zatížení krokve v kap. 4.2.3.

$$\begin{aligned} 1, F_{sk,levy} &= 5,22 \text{ kN}, F_{k,pravy} = 5,22 \text{ kN} \\ 2, F_{sk,levy} &= 4,87 \text{ kN}, F_{k,pravy} = 2,97 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Zatížení větrem

### **Zatížení pro horní pás**

Zatížení větrem určeno jako akce vyvozené ze zatížení krokve v kap. 4.2.3.

$$\begin{aligned} 1, \text{ osa z: } F_{kw,max,levy} &= 7,32 \text{ kN} = F_{kw,max,pravy} = 7,32 \text{ kN} \\ \text{osa x: } F_{kw,max,levy} &= 0,49 \text{ kN} = F_{kw,max,pravy} = -0,49 \text{ kN} \\ 2, \text{ osa z: } F_{kw,min,levy} &= -10,76 \text{ kN} = F_{kw,min,pravy} = -10,76 \text{ kN} \\ \text{osa x: } F_{kw,min,levy} &= -6,12 \text{ kN} = F_{kw,min,pravy} = 6,12 \text{ kN} \end{aligned}$$

### **Zatížení pro pochozí vrstvu**

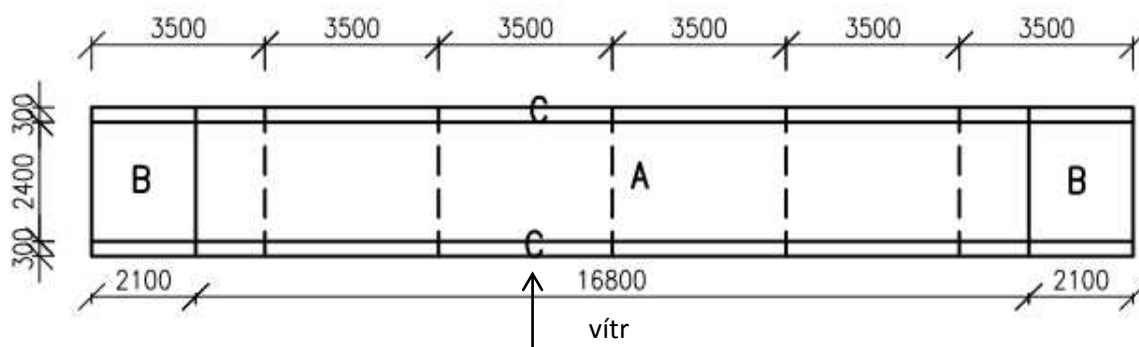
výška nad terénem  $z_I = 5,8 \text{ m}$

Přepočet maximálního charakteristického tlaku



$$q_p(z) = 0,787 \text{ kN/m}^2$$

Výpočet dle [5] jako pultový přístřešek se sklonem  $\alpha=0^\circ$ . Součinitele tlaku  $c_{p,net}$  jsou přiřazeny k jednotlivým oblastem střechy (viz obr. 34).



**Obr.34:** Oblasti součinitelů tlaků  $c_{p,net}$  [6]

Součinitel plnosti

$$\varphi = 0,054$$

Součinitele výsledného tlaku (sklon  $\alpha=0^\circ$ )

$$\begin{aligned} \text{oblast A } c_{p,net} &= 0,5 \text{ (maximum)} \\ \text{A } c_{p,net} &= -0,62 \text{ (minimum)} \\ \text{C } c_{p,net} &= 1,1 \text{ (maximum)} \\ \text{C } c_{p,net} &= -1,42 \text{ (minimum)} \\ \text{B } c_{p,net} &= 1,8 \text{ (maximum)} \\ \text{B } c_{p,net} &= -1,31 \text{ (minimum)} \end{aligned}$$

Výpočet jednotlivých zatížení větrem do uzlů uvnitř konstrukce

$$F_{kw,max} = q_{p(z)}(c_{A,p,net} \cdot 1,2 + c_{C,p,net} \cdot 0,3) \cdot 3,5 = 0,787 (0,5 \cdot 1,2 + 1,1 \cdot 0,3) \cdot 3,5 = 2,56 \text{ kN}$$

$$F_{kw,min} = q_{p(z)}(c_{A,p,net} \cdot 1,2 + c_{C,p,net} \cdot 0,3) \cdot 3,5 = 0,787 (-0,62 \cdot 1,2 - 1,42 \cdot 0,3) \cdot 3,5 = -3,22 \text{ kN}$$

Výpočet zatížení větrem do uzlů na okraji konstrukce (uplatní se pouze oblast B)

$$F_{kw,max} = q_{p(z)}(c_{B,p,net} \cdot 1,5 \cdot 1,75) = 0,787 (1,8 \cdot 1,5 \cdot 1,75) = 3,72 \text{ kN}$$

$$F_{kw,min} = q_{p(z)}(c_{B,p,net} \cdot 1,5 \cdot 1,75) = 0,787 (-1,31 \cdot 1,5 \cdot 1,75) = -2,61 \text{ kN}$$

### **Příčné zatížení větrem pro příhradovou konstrukci**

Výpočet dle normy [5] podle vzorce

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Součinitel síly pro příhradové konstrukce a lešení s paralelními pásy

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{v} = \frac{0,012 \cdot 24,7}{15 \cdot 10^{-6}} = 19760$$

kde  $b$  je průměr prvku

$v$  kinetická viskozita vzduchu

$v(z_e)$  maximální rychlost větru ve výšce  $z_e$

$c_{f,0}$  určen z grafu jako funkce závislá na Reynoldsovu číslu  $Re$  a součinitele plnosti  $\varphi$

$$c_{f,0} = 1,82$$

Součinitel koncového efektu  $\psi_\lambda$  určen z grafu jako funkce součinitele plnosti  $\varphi$  a štíhlosti  $\lambda$

$$\lambda = \frac{L}{d} = \frac{23}{2,7} = 8,51$$

$$\psi_\lambda = 0,99$$

Součinitel síly

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 1,82 \cdot 0,99 = 1,80$$

**Určení součinitele konstrukce  $c_s, c_d$  dle [5] přílohy B**

Měřítka délky turbulence

$$L_{(z_s)} = L_t \left( \frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha = 300 \left( \frac{7,425}{200} \right)^{0,52} = 54,12m \quad \text{pro } z \geq z_{min}$$

kde  $z_t = 200m$  je referenční výška,

$L_t = 300m$  měřítko délky,

$z_{min}$  minimální výška

$z_0$  parametr drsnosti terénu

$z_s = 7,425m$  referenční výška

$$\text{exponent} \quad \alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \ln 0,05 = 0,52$$

Výkonová spektrální hustota  $S_L(z_s, n_{1,x})$  flukтуаční složky rychlosti větru ve výšce  $z$

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z, n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z, n))^{5/3}} = \frac{6,8 \cdot 9,78}{(1 + 10,2 \cdot 9,78)^{5/3}} = 0,03$$

Základní vlastní frekvence (výpočet v Scia Engineer)  $n_{1,x} = 4,29 \text{ Hz}$

Střední rychlost větru v referenční výšce  $z_s = 7,425 \text{ m}$   $v_m(z_s) = 23,75 \text{ m/s}$

Bezrozměrná frekvence  $f_L(z, n) = n_{1,x} \cdot \frac{L(z)}{v_m(z_s)} = 4,29 \cdot \frac{54,12}{23,75} = 9,78$

Součinitel odezvy pozadí

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} = \frac{1}{1 + 0,9 \left( \frac{23+3,25}{54,12} \right)^{0,63}} = 0,64 \leq 1$$

Součinitel maximální hodnoty

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} = \sqrt{2 \cdot \ln(0,832 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,832 \cdot 600)}} = 3,70$$

Doba integrace při stanovení střední rychlosti větru  $T=600 \text{ s}$

Frekvence přechodů s kladnou směrnici

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{R^2 + B^2}} = 4,29 \sqrt{\frac{0,025}{0,025 + 0,64}} = 0,832$$

Rezonanční část odezvy

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,09} \cdot 0,03 \cdot 0,30 \cdot 0,05 = 0,025$$

Celkový logaritmický dekrement útlumu pro dřevěné mosty  $\delta=0,06-0,12 \rightarrow \delta=0,09$

Aerodynamické admitace pro základní tvar kmitu

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2n_h^2} \cdot (1 - e^{-2\eta_h}) = \frac{1}{2,70} - \frac{1}{2 \cdot 2,70^2} (1 - e^{-2 \cdot 2,70}) = 0,30$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2n_b^2} \cdot (1 - e^{-2\eta_b}) = \frac{1}{19,12} - \frac{1}{2 \cdot 19,12^2} (1 - e^{-2 \cdot 19,12}) = 0,05$$

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{4,6 \cdot 3,25}{54,12} 9,78 = 2,70$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{4,6 \cdot 23,0}{54,12} 9,78 = 19,12$$

Součinitel konstrukce

$$c_s c_d = \frac{1+2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2+R^2}}{1+7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1+2 \cdot 3,70 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{0,64+0,025}}{1+7 \cdot 0,2} = 0,92$$

Maximální dynamický tlak pro součinitel orografie  $c_o(z_e) = 1$

$$q_p(z_e) = q_b \cdot c_e(z_e) = 0,391 \cdot 2,30 = 0,899 \text{ kNm}^{-2}$$

Základní tlak větru dle tabulky

$$q_b = 0,391 \text{ kNm}^{-2}$$

Součinitel expozice ve výšce  $z_e$

$$c_e(z_e) = 2,30 \text{ (interpolace)}$$

Zatížení větrem do uzlů uvnitř konstrukce

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 0,92 \cdot 1,80 \cdot 0,899 \cdot 2 \cdot 0,012 (2 \cdot 2,21 + 2 \cdot 1,75 + 1,35) = 0,33 \text{ kN}$$

Zatížení větrem do uzlů na krajích konstrukce

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 0,92 \cdot 1,80 \cdot 0,899 \cdot 0,012 \cdot 2 \cdot (2,21 + 1,75 + 1,35 + 1,44) = 0,26 \text{ kN}$$

- Užitné zatížení

Loadmodel 4

$$q_k = 5 \text{ kN/m}^2$$

Břemeno působící do jednoho uzlu

$$Q_k = q_k \cdot 3 \cdot 3,5 \cdot 0,5 = 5 \cdot 3 \cdot 3,5 \cdot 0,5 = 26,25 \text{ kN}$$

### **Podporové reakce**

Hodnoty podporových reakcí jsou nutné pro návrh nosných ložisek.

Kombinace CO8 (zat. stále, sníh celý, vítr max. dolů, užitné-dominantní)

$$R_{\max} = 179,18 \text{ kN}$$

Kombinace CO2 (zat. stále min., vítr min. nahoru-dominantní)

$$R_{\min} = -54,22 \text{ kN}$$

Podpory lávky musí být pevně ukotveny kvůli možnému vzniku záporných reakcí a proti nadzvednutí konstrukce.

### 4.3.2 Výpočet mezního stavu použitelnosti

Složky průhybu jsou výsledkem kombinace zatížení dle normy [8]. Konstrukce je složena z prvků dílců a spojů se stejným dotvarováním. Platí lineární závislost mezi zatížením a deformací, můžeme tedy konečný průhyb spočítat následovně.

Hodnoty průhybů: Vlastní tíha	$w_{inst,G} = 2,2mm$
Užitné	$w_{inst,Q1} = 13,1mm, \psi_{2,1} = 0,6(shromažďovací plochy)$
Vítr	$w_{inst,Q2} = 4,9mm, \psi_{2,1} = 0$
Sníh	$w_{inst,Q3} = 2,6mm, \psi_{2,2} = 0$

Hodnota  $k_{def}$   $k_{def}=2,00$  (RD, třída provozu 3)

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q1} + w_{fin,Qj} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) + w_{inst,Q,1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) + \\ + \sum_{i=1}^j w_{inst,Q,i}(\psi_{0,i} + \psi_{2,1}k_{def}) = 2,2 \cdot (1 + 2) + 13,1(1 + 0,6 \cdot 2,00) + \\ + 4,9(0,6 + 0 \cdot 2,00) + 2,6(0,5 + 0 \cdot 2,00) = 39,66mm$$

Limitní průhyb pro lávky  $\delta_{limit} = \frac{L}{250} = \frac{21000}{250} = 84mm$

Posudek

$$\delta_{limit} = 84mm \geq \delta_{skut} = 39,66mm \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

### 4.3.3 Dynamický výpočet nosné konstrukce

Dynamický výpočet spočívá v analýze kmitání konstrukce způsobené pohybem chodců dle příslušné normy [6]. Stanovení vlastních tvarů a vlastních frekvencí bude provedeno pomocí modální analýzy v programu Scia Engineer. Pokud konstrukce vykazuje nižší hodnoty vlastních frekvencí než normou stanovené, musí se provést podrobná analýza dynamického chování lávky.

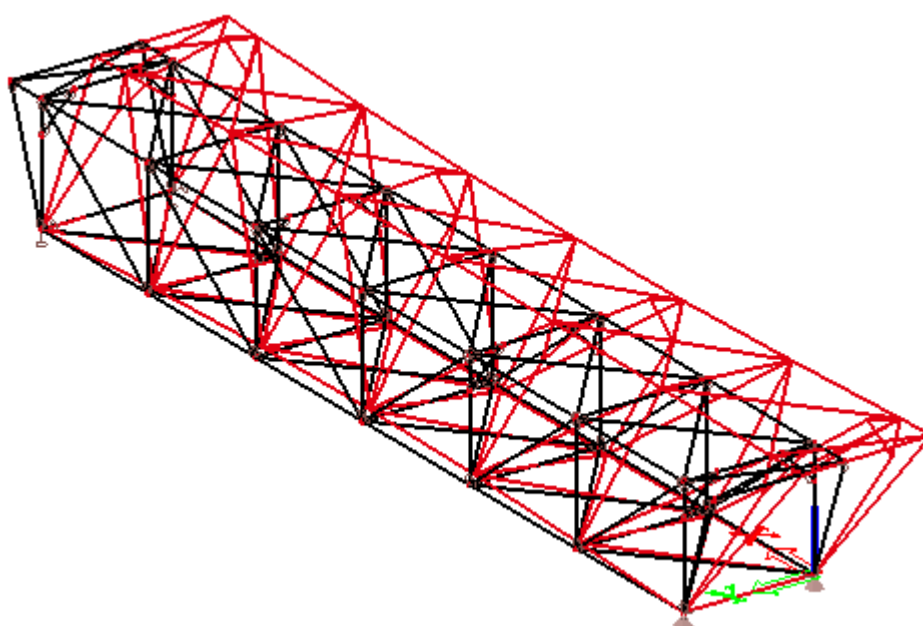
Výpočet vlastních tvarů a vlastního kmitání způsobeného pohybem chodců je vyžadován ve svislém, vodorovném a torzním směru. Výsledky pro rozhodující kritické vlastní tvary jsou v tabulce 5. Podrobné výsledky pro prvních 10 vlastních frekvencí jsou uvedeny v tabulce 6. Vlastní tvary konstrukcí jsou znázorněny na obrázcích 35-35.

Druh vynuceného kmitání	Vypočtená frekvence[Hz]	Limitní frekvence[Hz]	Podrobný dynamický výpočet
Svislé- chodci	13,26	5	ne
Vodorovné	4,29	2,5	ne
Torzní	15,08	2,5	ne

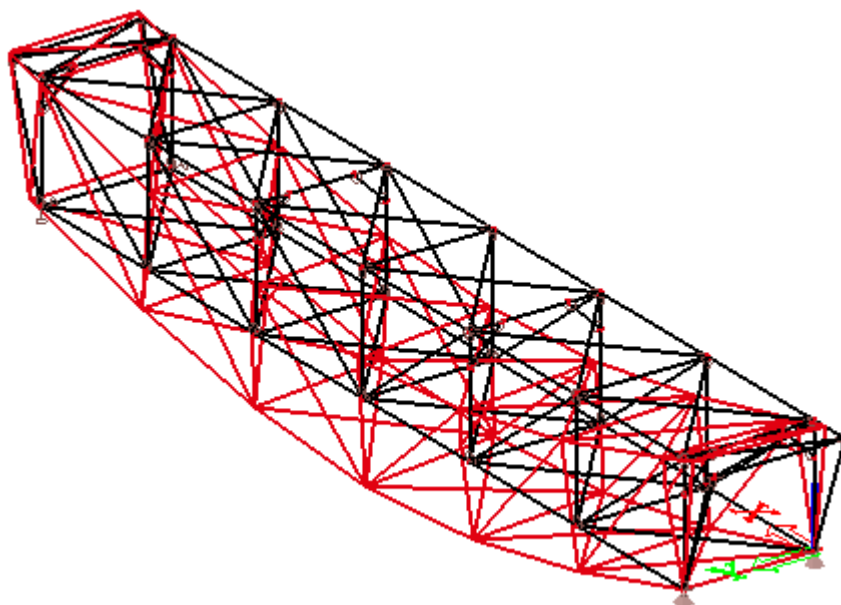
**Tabulka 6:** Výpis vlastních frekvencí

N	f [Hz]	$\omega$ [1/s]	$\omega^2$ [1/s <sup>2</sup> ]	T [s]
<b>Kombinace hmot : CM1</b>				
1	4,29	26,94	725,97	0,23
2	10,90	68,48	4689,46	0,09
3	13,26	83,34	6945,11	0,08
4	15,08	94,75	8977,57	0,07
5	20,05	125,99	15874,66	0,05
6	28,94	181,80	33052,41	0,03
7	32,14	201,94	40780,26	0,03
8	34,98	219,78	48304,87	0,03
9	35,36	222,16	49352,94	0,03
10	43,18	271,28	73591,60	0,02

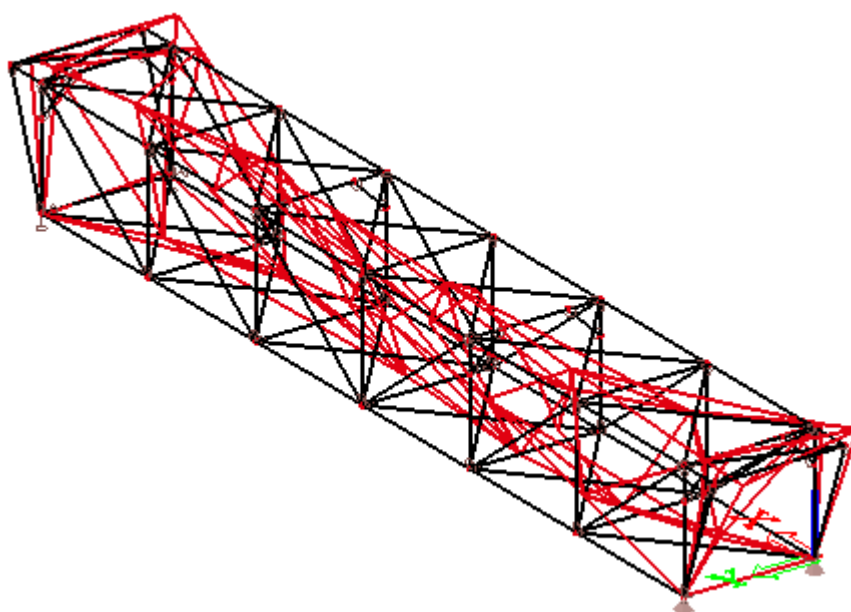
Tabulka 7: Výpis vlastních frekvencí



Obr.35: Vlastní tvar ve vodorovném směru



**Obr.36:** Vlastní tvar ve svislém směru



**Obr.37:** Vlastní tvar v torzním směru

Konstrukce ve všech posuzovaných směrech má vyhovující parametry vlastních frekvencí, nemusí se proto provádět podrobný dynamický výpočet. Konstrukce vyhoví na dynamická zatížení způsobená chodci, odezva konstrukce na zatížení chodci nebude významná.

#### 4.4 Návrh a posouzení vybraných nosných prvků

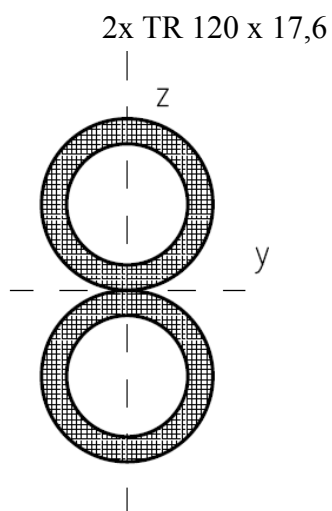
Návrh a posouzení se provede dle normy [7] a to vždy pro reprezentativní nejvíce namáhaný prvek konstrukce pro mezní stav únosnosti.

Do konstrukce působí příčné zatížení větrem, proto i výsledné vnitřní síly v příhradových nosnících nebudou symetrické.

Výpočet, návrh a posudek vybraných nosných prvků viz přílohu 1 (4. Výpočet hlavní nosné konstrukce).

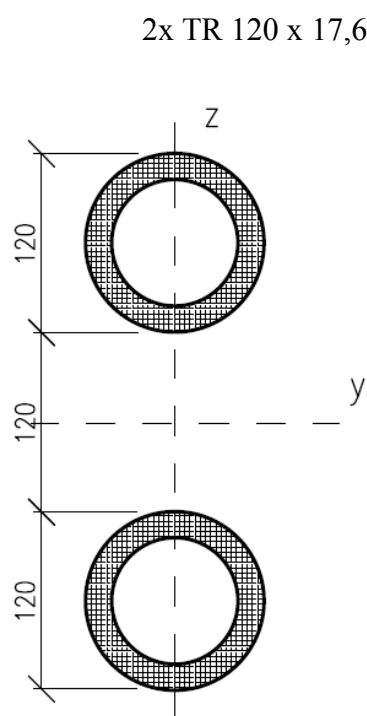
### Návrh profilů prutů

Tažená diagonála



**Obr.38:** Profil 2x TR 120 x 17,6

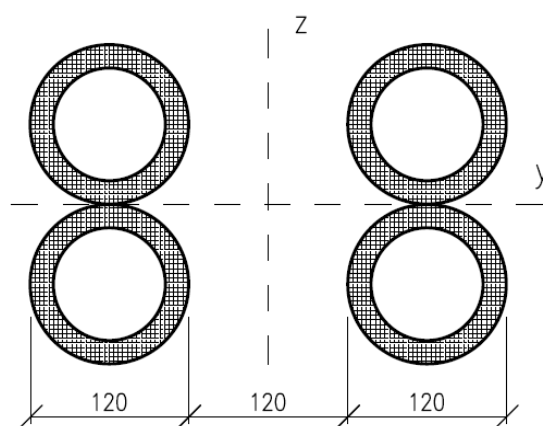
Svislice



**Obr.39:** Profil 2x TR 120 x 17,6



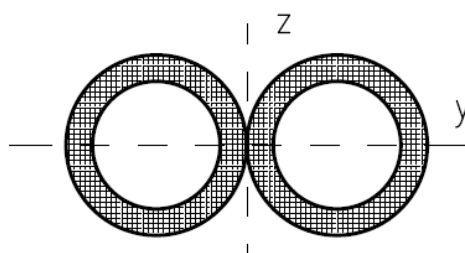
Pro tlačnou diagonálu, spodní pás, horní pás 4 x TR 120 x 17,6



**Obr.40:** Profil 4x TR 120 x 17,6

Vodorovná diagonála

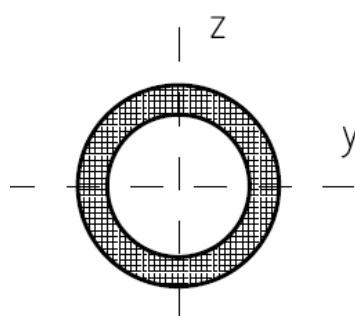
2 x TR 120 x 17,6



**Obr.41:** Profil 2x TR 120 x 17,6

Horní příčnick

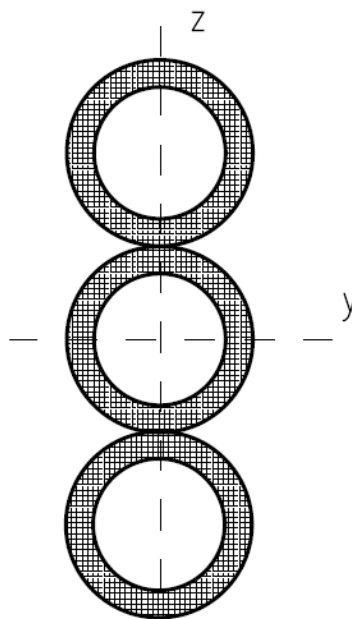
1 x TR 120 x 17,6



**Obr.42:** Profil 1x TR 120 x 17,6

Spodní příčník

3 x TR 120 x 17,6



Obr.43: Profil 2x TR 120 x 17,6

#### 4.5 Návrh a posouzení vybraných spojů

Navrhovaný spoj bude pro spojení svislice s horním pásem. Do výpočtů u ostatních spojů vstupují přídatné ohybové momenty a nebudou předmětem výpočtu.

Spoj bude svorníkového typu dřevo-dřevo. Svorník bude navržen na M14x420 (4.6). Předvrtané otvory budou o průměru 15,5 mm. U svorníků namáhaných příčně selhání bude doprovázeno nadměrným otláčováním bambusu, ohybem svorníku nebo jejich kombinací. Návrh a posudek se provede dle normy [7].

Rozhodující vnitřní síla

$$N_{Ed} = -16,53 \text{ kN}$$

Návrhová síla pro jeden svorník

$$N_{Ed} = \frac{16,53}{4} = 4,13 \text{ kN}$$

Úhel zatížení vzhledem k vláknům diagonály

$$\alpha = 0^\circ$$

Úhel zatížení vzhledem k vláknům svislice

$$\gamma = 90^\circ$$

#### Minimální rozteče

$$\text{Horní pás: } a_{4,t} = \max \left\{ \begin{array}{l} (2 + 2\sin\gamma)d = 56 \\ 3d = 42 \end{array} \right\} = 56 \text{ mm} \leq \frac{h_{pas}}{2} = 60 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 3d = 42 \leq \frac{h_{pas}}{2} = 60 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
\text{Svislice: } a_{3,t} &= \max \left\{ \frac{7d = 98 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} \right\} = 98 \text{ mm} \leq 120 \text{ mm} \\
a_{3,c} &= \max \left\{ \frac{(1 + 6 \sin \alpha)d = 14 \text{ mm}}{4d = 56} \right\} = 56 \text{ mm} \leq 120 \text{ mm} \\
a_{4,c} &= 3d = 3 \cdot 14 = 42 \text{ mm} \leq \frac{h_{\text{svislice}}}{2} = 60 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Pevnost v otláčení

$$\begin{aligned}
f_{h,0,k} &= 0,082(1 - 0,01d)\rho_k = 0,082(1 - 0,01 \cdot 14)650 = 45,84 \text{ MPa} \\
k_{90} &= 0,90 + 0,015d = 0,90 + 0,015 \cdot 14 = 1,11 \\
f_{h,1,k} &= f_{h,\alpha=0,k}^{\text{svislice}} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{45,84}{1,11 \cdot \sin^2 0 + \cos^2 0} = 45,84 \text{ MPa} \\
f_{h,2,k} &= f_{h,\alpha=90,k}^{\text{pas}} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{45,84}{1,11 \cdot \sin^2 90 + \cos^2 90} = 41,30 \text{ MPa} \\
\beta &= \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = \frac{41,30}{45,84} = 0,90
\end{aligned}$$

Plastický moment únosnosti svorníku

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} = 0,3 \cdot 400 \cdot 14^{2,6} = 114 \text{ Nm}$$

Posudek

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{aligned} &f_{h,1,k} t_1 d = 45,84 \cdot 2 \cdot 17,6 \cdot 14 = 22589 \text{ N} \\ &0,5 f_{h,2,k} t_2 d = 0,5 \cdot 41,03 \cdot 2 \cdot 17,6 \cdot 14 = 10619 \text{ N} \\ &1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = \\ &= 1,05 \frac{45,84 \cdot 3,52 \cdot 14}{2 + 0,90} \left[ \sqrt{2 \cdot 0,90(1 + 0,90) \frac{4 \cdot 0,90(2 + 0,90) \cdot 114}{45,84 \cdot 14 \cdot 3,52^2}} - 0,90 + 0 \right] + \frac{0}{4} = 10789 \\ &1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 1,15 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,90}{1 + 0,90}} \sqrt{2 \cdot 114 \cdot 45,84 \cdot 14} + \frac{0}{4} = 18211 \end{aligned} \right.$$

Rozhoduje otláčení pásnice

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} F_{v,Rk}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 10619}{1,3} = 5718 \text{ N}$$

Únosnost jednoho svorníku (2-střížný)

$$F_{v,Rd} = 2 F_{v,Rd} = 2 \cdot 5,72 = 11,44 \text{ kN} > F_{Ed} = 4,13 \text{ kN} \rightarrow \text{Vyhoví}$$

## 5. Laboratorní ověření vlastností bambusu

Hodnoty materiálových charakteristik bambusu *Guadua* se velice liší a jsou vždy závislé na způsobu testování, na kvalitě samotného bambusu, jeho stáří a relativní vlhkosti. Většina výrobců bambusů se nachází v zahraničí. Jejich výrobky nemusí odpovídat českým státním normám, proto je z těchto důvodů nutné si materiálové charakteristiky laboratorně. Zkoušky budou provedeny v souladu s ČSN [14] a mezinárodní normou [15], která se zabývá zkušebnictvím bambusu.

### 5.1 Popis zkoušek

Bude zjišťována pevnost v tlaku a pevnost v ohybu.

Všechny zkoušky se budou provádět na zkušebních tělesech kondicionovaných v standardním prostředí s teplotou  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  a  $(65 \pm 5)\%$  relativní vlhkosti.

Zkušební tělesa budou kondicionována v prostředí, kde jsou skladována a budou z něj vytažena maximálně 1 hodinu před zkoušením.

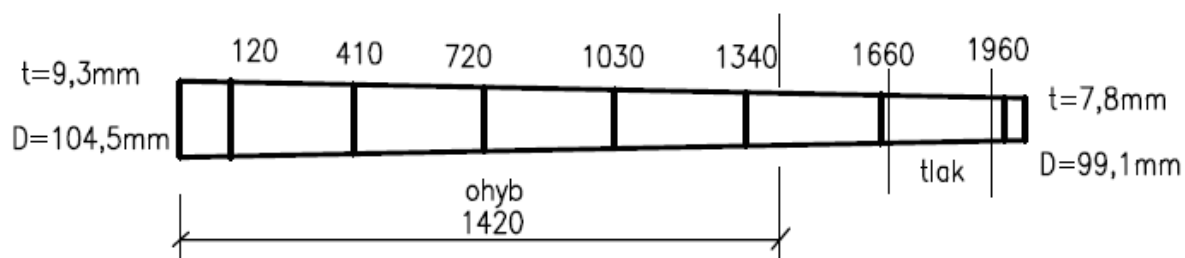
Rozměr proměnného průřezu bude brán jako průměr z obou konců tyče.

Rychlost zatěžování se nastaví tak, aby se dosáhlo maximálního zatížení v průběhu  $(300 \pm 120)\text{s}$ . Tato rychlost bude stanovena z předběžných zkoušek.

Určení relativní vlhkosti a hustoty bambusové hmoty je v těchto případech opomenuto.

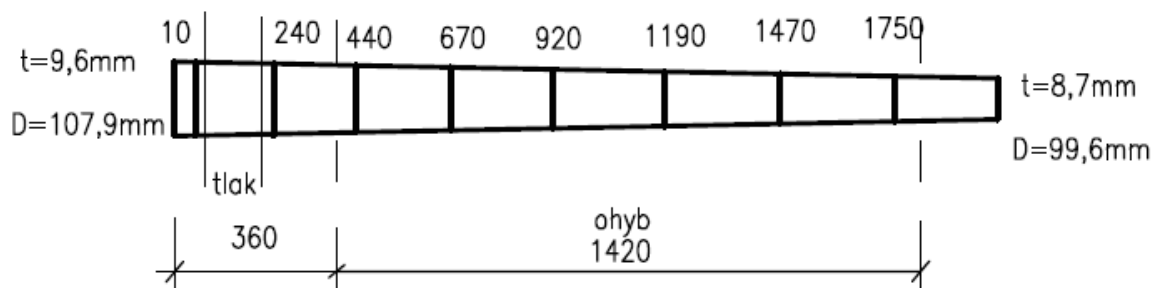
#### Geometrický popis vzorků dle [15]

Vzorek 1

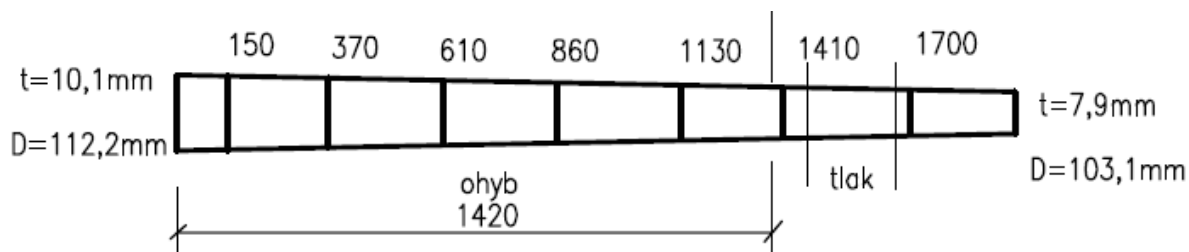


Obr. 44: Vzorek 1

Vzorek 2



Obr. 45: Vzorek 2



Obr. 46: Vzorek 3

### 5.1.1 Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny

Zkušební vzorky budou mít menší délku než je vzdálenost mezi dvěma kolénky. Zkušební vzorek nesmí obsahovat kolénko, neboť tato část je pevnější a zvyšovala by pevnost slabší mezikolénkové části.

Zkoušené vzorky jsou značně podélně rozpraskány, proto se u hlav zajistí lepicí páskou.

Konce vzorků budou seřezány kolmo ke své zatěžovací ose.

Maximální hodnota zatížení musí být dosažena v čase  $(300 \pm 120\text{s})$

Hlavy lisu musí přesně dosedat na hrany bambusu.

Norma [15] předepisuje, že mezi koncem vzorku a hlavou lisu musí být plocha s minimálním třením, aby se dovolilo příčnému přetváření vzorku. Toto můžeme provést za pomoci olověné destičky posypané sírou. V těchto laboratorních podmínkách však tento předpis normy nelze splnit.

### 5.1.2 Stanovení pevnosti v ohybu

Jde o čtyřbodový ohyb.

Dle [14] nejmenší délka zkušebního tělesa musí být 19násobek výšky průřezu.

$$L = 19h = 19 \cdot 100 = 1900\text{mm}$$

Norma [15] uvádí vzorec pro minimální délku vzorku

$$L_{min} = 26D = 26 \cdot 100 = 2600\text{mm}$$

Skutečná délka tělesa

$$L = 1320\text{ mm}$$

Zatěžovací hlavy jsou vzdáleny od sebe jednu třetinu celkové vzdálenosti podpor od sebe.

Mezi zkušební těleso a zatěžovací hlavy jsou vloženy pryžové podložky proti otlačení.

## 5.2 Vyhodnocení zkoušek

Proběhly vždy 3 zatěžovací zkoušky na 3 vzorcích. Rozměry jsou průměrem ze 3 měření

### 5.2.1 Pevnost v tlaku

Měřené tloušťky stěn

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
$t_1$	7,9	7,5	9,7
$t_2$	7,8	8,0	9,8
$t_3$	8,3	7,7	10,4
$t_{prum}$	8,0	7,7	10,0

**Tabulka 8:** Tloušťky stěn vzorků

Měřené průměry vzorků

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
$d_1$	102,3	95,5	105,3
$d_2$	94,4	96,6	99,8
$d_3$	99,2	96,0	102,4
$d_{prum}$	98,6	96,0	102,5

**Tabulka 9:** Průměry vzorků

Pevnost v tlaku

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A}$$

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
A [mm <sup>2</sup> ]	2277	2136	2905
F <sub>max</sub> [kN]	118,3	117,1	159,1
čas[s]	412	311	344
f <sub>c,0</sub> [MPa]	51,9	54,8	54,7
rychlost zatěžování[kN/min]	15	20	25

**Tabulka 10:** Výsledky tlakové zkoušky

Aritmetický průměr pevnosti v tlaku je 53,8 MPa. V této práci byla použita hodnota pevnosti v tlaku 56MPa. Obě hodnoty se liší o 4%. Zvolená pevnost v tlaku pro numerický model až výjimečně přesně odpovídá skutečným naměřeným hodnotám.

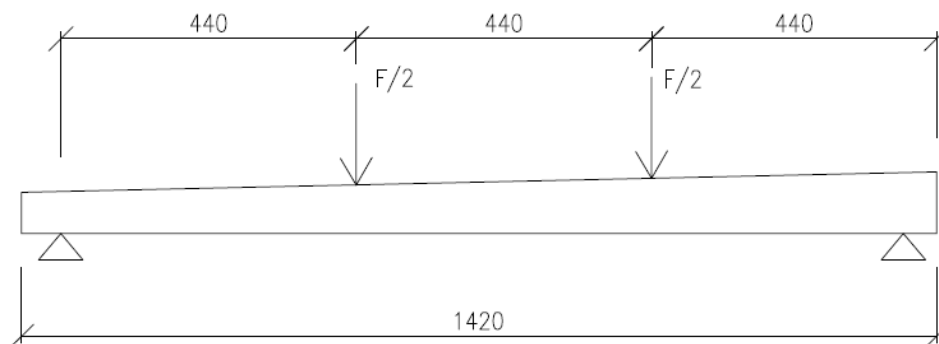
Při všech třech měřeních při porušení vznikly podélné praskliny. Vzorky se porušily tahem kolmo na vlákna a vyboulením stěn (viz obr. 46).



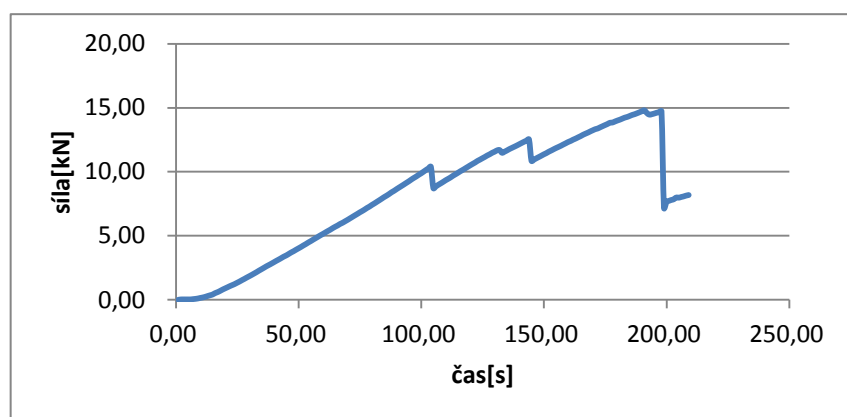
**Obr. 46:** Porušení tlakem

### 5.2.2 Pevnost v ohybu

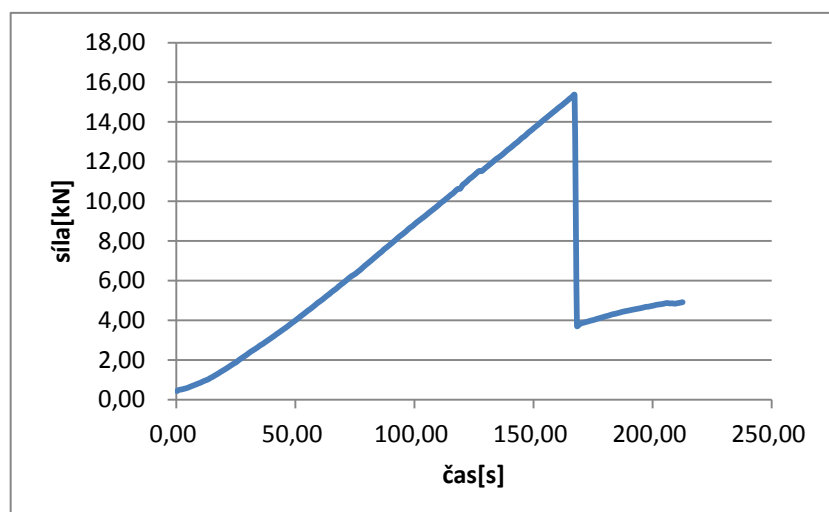
Zatěžování probíhalo podle následujícího statického schématu.



Obr. 47: Statické schéma ohybové zkoušky

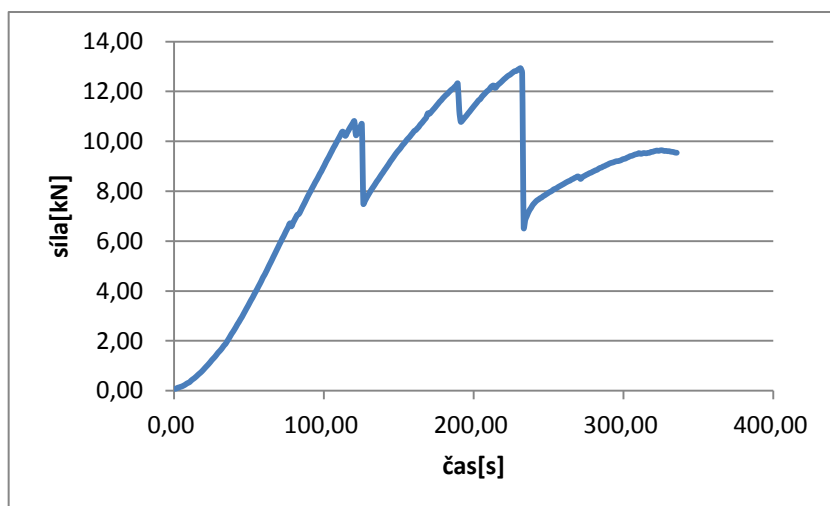


Obr. 48: Zatěžovací graf vzorku 1



Obr. 49: Zatěžovací graf vzorku 2





Obr. 50: Zatěžovací graf vzorku 2

Moment setrvačnosti se stanoví podle vzorce

$$I = \frac{\pi}{64} [(D^4 - (D - 2t)^4)]$$

Pevnost v ohybu

$$f_m = F \cdot L \cdot \frac{D}{12 \cdot I}$$

Geometrické údaje vzorků viz obrázky 44-46.

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
$t_{\text{prum}}[\text{mm}]$	8,6	9,2	9,0
$D_{\text{prum}}[\text{mm}^2]$	101,8	103,8	107,7
$F_{\text{max}}[\text{kN}]$	14,73	15,36	12,93
$I[\text{mm}^4]$	2757326	3087516	3426494
$f_m[\text{MPa}]$	59,8	56,8	44,7
čas[s]	198	183	231

Tabulka 11: Výsledky ohybové zkoušky

Aritmetický průměr pevnosti v ohybu je 53,8 Mpa. V této práci byla použita hodnota pevnosti v ohybu 100MPa. Obě hodnoty se liší téměř dvojnásobně. Rozdíl hodnot je dán špatnou kvalitou zkoušených prvků. Všechny vzorky měly podélné praskliny, které významně ovlivnily výsledky zkoušky.

Při všech třech zatěžovacích zkouškách došlo k porušení podélným smykem a někdy také vyboulením stěny (viz obr. 51)



**Obr. 51:** Porušení ohybem

Shodou okolností výsledné hodnoty zkoušek na ohyb a tlak se přesně shodují na desetinné číslo. Můžeme kromě údivu uvažovat také nad tím, že mechanismus porušení je v těchto případech podobný. Vždy jde o porušení struktury bambusové stěny kolmo na vlákna.

## 6. Závěr

V bakalářské práci byla navržena konstrukce lávky pro pěší z bambusových tyčí. Jednotlivé pruty byly nadimenzovány a posouzeny jako vyhovující na mezní stav únosnosti a použitelnosti dle současných platných norem.

V dynamickém výpočtu konstrukce ve vodorovném, svislém a torzním směru má vyhovující parametry vlastních frekvencí a nemusí se proto provádět podrobný dynamický výpočet. Dynamická odezva na zatížení chodci nebude významná.

Tato práce poukazuje na to, že bambusové tyče lze použít nejenom pro příhradové konstrukce lávek, ale lze ho také aplikovat pro různé jiné stavební konstrukce. Díky své nízké hmotnosti, vysoké pevnosti, vysokému modulu pružnosti a snadné obnovitelnosti se může stát novým alternativním stavebním materiálem budoucnosti, který může nahradit dřevo a ostatní stavební materiály.

Během laboratorních zkoušek bylo zjištěno, že bambus při nízké relativní vlhkosti ovzduší může snadno vysychat a tedy i popraskat. Tento trend je obzvlášť výrazný během zimních měsíců. Proto je nutné bambus chránit proti nadměrnému vysychání.

Všechny bambusové konstrukce musí být chráněny proti povětrnostním podmínkám buď nátěry anebo lépe zastřešením nebo opláštěním. Všechny díly vystaveny UV záření nebo vodě velice rychle degradují. Lávku bylo proto nutné zastřešit a opatřit ochranným nátěrem.

V provedených laboratorních zkouškách stanovená pevnost v tlaku velice přesně odpovídá udávané průměrné hodnotě bambusů Guadua. Ve zkoušce na ohyb byl zkoušený materiál zhruba o polovinu slabší. Při ohybu docházelo k výraznému porušování podélným smykem. Náchylnost k striktně podélnému porušování byla také patrná u tlaku. Zde však dominovalo porušení v tahu kolmo na vlákna. Z provedených zkoušek je zřejmé, že kolaps u bambusu probíhá, nikoliv rozdrčením bambusové hmoty, ale zhroucením bambusových stěn a celé geometrie tyče.

## 7. Seznam použitých pramenů

- [1] MINKE, Gernot. *Building with Bamboo*. Birkhauser, Basel, 2012. ISBN 978-3-0346-0748-3
- [2] JANSSEN, Jules J.A.. *Mechanical Properties of Bamboo*. Springer Science 1991. ISBN 978-94-010-5426-3
- [3] ČSN EN 1991-2 *Zatížení konstrukcí- Část 2: Zatížení mostů dopravou*
- [4] ČSN EN 1991-1-3 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem*
- [5] ČSN EN 1991-1-4 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*
- [6] ČSN EN 1990 A1(73 0002) *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, Příloha A2- použití pro mosty*
- [7] ČSN EN 1995-1-1 *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla- Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*
- [8] ČSN EN 1990 A1(73 0002) *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*
- [9] <http://kovprof.cz/hlavni-stranka/trapezove-profilu/technicke-informace/tabulky-unosnosti/>
- [10] <http://www.guaduabamboo.com/>
- [11] <http://bambusarium.cz/bambusy/>
- [12] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bambus>
- [14] ČSN EN 408+A1: *Dřevěné konstrukce- Konstrukční dřeva lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*
- [15] ISO 22157-1:2004: *Bamboo -- Determination of physical and mechanical properties -- Part 1: Requirements*

## 8. Seznam příloh

*Příloha 1: Statický výpočet přístřešku a nosné konstrukce*

*Příloha 2: Výpis zatěžovacích stavů a jejich kombinací*

## **9. Seznam výkresové části**

<i>Výkres č.1</i>	<i>Půdorys, řez B-B', pohled C-C', řez D-D', Detail 1</i>	<i>M 1:50</i>
-------------------	---	---------------